



TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: Ginesta Jové Artal

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol de Treball Final de Grau:

Anàlisi experimental de les prestacions d'un prototip que actua com a col·lector solar tèrmic diürn i com a refrigerador radiant nocturn.

Director/a: Marc Medrano Martorell

Presentació

Mes: Març

Any: 2020

Resum

Les conseqüències del canvi climàtic es fan cada cop més evidents i dràstiques i empenyen a la societat a buscar noves maneres de proveir-se d'energia de manera sostenible.

Aquest context ha permès l'aprofundiment en l'estudi de la refrigeració radiant com a alternativa sostenible als sistemes de refrigeració i l'aparició de conceptes com el RCE que es presenta en aquest treball.

Aquest concepte, que combina la col·lecció de calor durant el dia i la refrigeració durant la nit per a la seva utilització de manera activa en l'ús domèstic, ha estat ideat, investigat i posat a prova a la Universitat de Lleida amb el disseny, creació i experimentació amb 2 prototips, un l'any 2017 i un altre el 2019.

El present treball final de grau es centra en l'anàlisi de les dades experimentals obtingudes del prototip del 2019 i en la comparació amb el prototip del 2017.

Els resultats obtinguts mostren el potencial d'aquesta tecnologia, produint potències mitjanes de 340 W/m^2 durant el dia i de uns 18 W/m^2 en el mode de refrigerador radiant durant la nit i assolint temperatures uns 2 graus per sota de la temperatura ambient.

Tot i que cal aprofundir en la recerca en aquest camp i en el de materials resistents i amb bones propietats òptiques, es demostra que és un concepte amb moltes possibilitats i que cal tenir en compte per a la millora en la construcció sostenible.

Agraïments

Aquest projecte representa la fi d'una etapa i és per aquest motiu que voldria expressar la meua gratitud a totes les persones i institucions que m'han acompanyat i ajudat durant tota aquesta etapa.

A l'Escola Politècnica Superior de Lleida (EPS) per l'esforç que fa any rere any per oferir una educació de qualitat al seus alumnes.

A tot el grup de recerca de la universitat de Lleida SEMB, per la seva predisposició a compartir els seus coneixements, per la bona acollida que m'han donat durant aquests mesos al seu grup i els consells i ajuda que m'han ofert des de el primer moment.

Agrair en especial al meu professor i tutor Marc Medrano pel seu suport i ajuda a l'hora d'encarar aquest repte. Per les seves aportacions que han ajudat a poder fer una bona feina i disponibilitat que m'ha ofert del seu temps en els casos de dubtes.

Als meus companys de classe que des de fa anys que ens ajudem mútuament, en especial a la Noèlia, que m'ha ensenyat grans petits trucs i detalls que han fet aquest projecte més fàcil de redactar.

I en especial, agrair a la meua parella i família tot el recolzament, paciència, comprensió i ajuda que m'han proporcionat durant aquests anys. Per la força que m'han donat contínuament i que sens dubte han estat indispensables per poder assolir aquest objectiu.

Gràcies.

Contingut

Resum	1
Agraïments	2
Índex de figures	4
1. Introducció	5
2. Antecedents	6
3. Objectius i abast	7
4. Marc teòric	8
4.1. Refrigeració per radiació	8
4.1.1. Fonaments de la radiació tèrmica (<i>q_{rad}</i>)	8
4.1.2. Radiació infraroja del cel (<i>q_{sky}</i>)	9
4.2. Energia solar tèrmica i captadors solars tèrmics	13
5. Cas d'estudi	15
5.1. Prototip RCE 2017	15
5.2. Prototip RCE 2019	16
5.3. Instal·lació experimental	19
5.4. Experimentació	20
5.5. Tractament de les dades	22
6. Resultats i Comparació	24
6.1. Resultats experimentació 2019	24
Comparació prototips RCE 2017 i RCE 2019	30
7. Conclusions	35
Bibliografia	36
Annex I: Fitxes tècniques	37
Annex II: Detalls experimentació	43
Diari	43
Taula resum	47
Annex III: Resultats experimentals	49
Setmana 2: 15 al 21 de juliol de 2019	49
Setmana 3: 22 al 28 de juliol de 2019	51
Setmana 4: 29 de juliol al 4 d'agost de 2019	53
Setmana 5: 5 al 11 d'agost de 2019	55
Setmana 6: 12 al 16 d'agost de 2019	57

Índex de figures

FIGURA 1: FLUXOS D'ENERGIA QUE ACTUEN SOBRE UNA SUPERFÍCIE. FONT: [8].....	8
FIGURA 2: PIRGEÒMETRE COMERCIAL. FONT:[9]	13
FIGURA 3: ESQUEMA DE L'EFFECTE DE L'ATMOSFERA TERRESTRE SOBRE LA RADIACIÓ SOLAR. FONT: [10]	14
FIGURA 4: COL·LECTOR SOLAR PER AL MODE DIÛRN A L'ESQUERRA I REFRIGERADOR RADIANT PER AL MODE NOCTURN A LA DRETA.....	15
FIGURA 5: ESQUEMA DE LA INSTAL·LACIÓ DE L'EXPERIMENT DEL 2017	15
FIGURA 6: BLOQUEIG DE LA RADIACIÓ INFRAROJA DE LA COBERTA DE VIDRE DEL COL·LECTOR COMERCIAL.....	16
FIGURA 7: ALTA REFLECTIVITAT DE L'ABSORBIDOR ORIGINAL DEL COL·LECTOR.....	17
FIGURA 8: REDUCCIÓ DE LA REFLECTIVITAT DE L'ABSORBIDOR DESPRÉS DE LES CAPES DE PINTURA.....	17
FIGURA 9: GRAELLA DE FILS DE NILÓ I LA POSTERIOR COL·LOCACIÓ DEL FILM DE POLIETILÈ	17
FIGURA 10: INSTAL·LACIÓ DE LES GUIES EN L'ESTRUCTURA DEL COL·LECTOR	18
FIGURA 11: INSTAL·LACIÓ DEL PROTOTIP RCE EN LA TEULADA DEL EDIFICI CREA	18
FIGURA 12: ESQUEMA DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL	19

1. Introducció

L'esser humà, al llarg de la història, ha utilitzat l'energia per a un propòsit: que la civilització avanci, arribi cada cop més lluny; utilitzant diferents fonts d'energia que han anat canviant i evolucionant a mesura que n'ha crescut la demanda i s'ha avançat tecnològicament.

Aquesta evolució però, ens ha dut a la situació actual, en la que urgeix trobar i invertir en tecnologies d'aprofitament d'energies renovables.

La refrigeració és una pràctica que consumeix molta energia en la societat moderna. Aproximadament el 40% de l'energia primària s'utilitza en el sector edificis i la major part d'aquesta es destina als sistemes convencionals de calefacció, ventilació i aire condicionat. Per tant, una tècnica que porti refrigeració sense consumir energia o amb un consum mínim, podria suposar una gran diferència en la conservació de l'energia i la reducció d'emissions. [1]

La refrigeració per radiació ha captat considerablement l'atenció durant l'últim segle per les seves aplicacions en l'estalvi d'energia ja que és una tècnica que permet l'alliberament de calor d'objectes terrestres cap a l'espai exterior, que actua com a una font freda, a través d'una finestra transparent d'infrarojos de l'atmosfera (8 – 13 μm). [2]

La recerca de materials que afavoreixen aquest intercanvi de calor ha permès l'aparició de nombroses propostes d'aparells refrigeradors radiants que utilitzen materials polimèrics així com materials gasosos (com ara l'etilè) i, a mesura que avancen les tècniques de fabricació, de nanomaterials. [3]

En general, la majoria d'estudis d'aprofitament de la refrigeració radiant es centren en el seu ús nocturn, doncs la potència de la radiació solar és un ordre de magnitud superior a la potència neta de la refrigeració radiant. Així doncs, si es combina la recollida d'energia solar diürna i la de refrigeració radiant nocturna, l'eficiència general de la recollida d'energia es pot ampliar considerablement. [4]

2. Antecedents

Actualment, la refrigeració radiant ja s'utilitza en l'arquitectura amb les anomenades "Teulades fredes" que combinen una alta reflectància solar amb una alta emissivitat infraroja reduint així els guanys de calor del sol i augmentant l'eliminació de calor. Així doncs, la refrigeració per radiació ofereix un gran potencial per a la refrigeració passiva complementària per a edificis comercials i residencials.

El grup de recerca de la universitat de Lleida SEMB (Sustainable Energy Machinery and Buildings), va iniciar un estudi l'any 2017 sobre l'estat de l'art de la refrigeració radiant i la possible aplicació en una tecnologia que l'utilitzi de manera activa. També analitza els efectes que tenen sobre una superfície els diferents materials amb diferents propietats òptiques que en permeten un millor funcionament com a superfície refrigeradora i enumera diferents models i tests experimentals amb dispositius amb la refrigeració radiant com a principi de funcionament. Conclou però que, tot i que s'han realitzat grans esforços des dels primers intents de provar nous aspectes que milloren el rendiment i l'aplicabilitat de la refrigeració radiant, la recerca en el concepte de producció combinada de calor i fred per refrigeració radiant és actualment escassa. [5]

En un treball posterior, el mateix grup de recerca SEMB, va desenvolupar un model teòric d'aquest nou concepte de producció combinada de calor i fred que varen anomenar RCE. [6]

Es va fer una validació experimental, que es descriurà en aquest projecte en apartats posteriors, que constava de dos equips, un per a la producció de calor i un altre per a la producció de fred.[7]

Finalment, es va desenvolupar el concepte RCE en un únic aparell i és, en aquest estudi experimental, el motiu d'aquest Treball Final de Grau.

3. Objectius i abast

Tal i com s'ha esmentat en l'apartat anterior, aquest projecte s'emmarca dins de la recerca del SEMB de demostrar que el nou concepte RCE (producció combinada de calor i fred per refrigeració radiant) és possible.

L'objectiu principal d'aquest treball doncs, és el de processar i analitzar en detall els resultats experimentals obtinguts de l'últim prototip RCE que ha estat en funcionament durant l'estiu del 2019 i que agrupa els dos modes de funcionament en un únic aparell. Es compararan també amb els resultats del dispositiu del 2017 en el que cada mode de funcionament tenia un dispositiu propi.

Es resumeix també el principi de funcionament dels dos modes de treball, sobretot el del mode de refrigerador radiant, ja que és una idea més innovadora i en estat d'estudi a diferència de la col·lecció solar tèrmica.

En aquest treball no s'entra en l'estudi de materials amb diferents propietats òptiques que es puguin aplicar en la millora del funcionament dels prototips. S'utilitzen els mateixos materials en els dos dispositius.

Tampoc s'analitzaran els beneficis que puguin aportar altres estructures o formes del prototip doncs els dos prototips tenen la mateixa forma, mida i estructura.

4. Marc teòric

4.1. Refrigeració per radiació

La refrigeració per radiació és el procés tèrmic a través del qual un cos emet calor cap a un altre cos a menor temperatura a través de radiació d'ona llarga. Aquest procés de refrigeració passa quan una superfície presenta un balanç de refrigeració net entre la radiació emesa i l'absorbida.

Els fluxos d'energia en una superfície es poden observar en la Figura 1 on la q_{rad} és l'energia irradiada, q_{sun} l'energia del sol absorbida, q_{sky} es refereix a la radiació atmosfèrica absorbida i la q_{loss} representa les pèrdues de refrigeració intrínseques. [8]

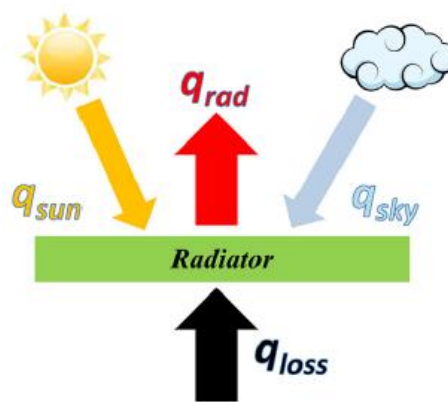


Figura 1: Fluxos d'energia que actuen sobre una superfície. Font: [8]

D'acord amb el principi de conservació de l'energia, la radiació infraroja efectiva emesa per una superfície ($q_{net-cooling}$) està definida com la diferència entre la radiació infraroja emesa per aquesta superfície (q_{rad}) i la radiació absorbida que es conforma tant per la provinent del sol (q_{sun}) com la de l'atmosfera (q_{sky}) i les pèrdues per conducció i convecció (q_{loss}):

$$q_{net-cooling} = q_{rad} - q_{sky} - q_{sun} - q_{loss} \quad (1)$$

4.1.1. Fonaments de la radiació tèrmica (q_{rad})

La radiació tèrmica, fonamentalment, sorgeix de les oscil·lacions i/o transicions aleatòries dels nivells d'energia en la matèria. Per a qualsevol superfície o volum a temperatura finita, la transferència d'energia és aquella realitzada per la emissió d'energia resultant en forma d'ones electromagnètiques, les quals consisteixen en quantitats finites d'energia o fotons.

Considerant un radiador encarat al cel, assumint que és una superfície amb una àrea A_r i a una temperatura T_r , la seva potència tèrmica es pot calcular mitjançant l'expressió:

$$q_{rad}(T_r) = A_r \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r) I_b(\lambda, T_r) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi d\lambda \quad (2)$$

On:

$\varepsilon_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r)$ indica la emissivitat direccional espectral del radiador a la temperatura de la superfície T_r .

$I_b(\lambda, T_r)$ és la intensitat de la radiació espectral d'un cos negre a temperatura T_r , $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$.

En aplicacions reals, l'efecte de l'angle azimuth (φ) pot ser negligible per a la majoria de càlculs d'enginyeria. A més a més, l'efecte de la temperatura de superfície T_r sobre l'emissivitat pot ser ignorat degut a la limitada variació de temperatura per a la refrigeració tèrmica. Així doncs, la potència tèrmica del radiador es pot simplificar de la següent manera:

$$q_{rad}(T_r) = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} e_r(\lambda, \theta) I_b(\lambda, T_r) \sin(2\theta) d\theta d\lambda \quad (3)$$

4.1.2. Radiació infraroja del cel (q_{sky})

L'atmosfera és una mescla complexa de diferents gasos com el vapor d'aigua, el diòxid de carboni, l'ozó, etc... que actuen com un radiador semi-transparent i debiliten la radiació tèrmica provinent de la terra cap a l'espai exterior en la majoria de les bandes de longitud d'ona. La radiació del cel es centra principalment en la banda d'ona d'infrarojos a causa de l'efecte global dels diferents gasos i temperatures del cel. Malgrat això, l'atmosfera és gairebé transparent en la finestra infraroja (8-13 μm), la qual és el canal clau per a la refrigeració per radiació.

D'acord amb els principis de la radiació tèrmica, la radiació infraroja del cel captada per un radiador pot expressar-se com:

$$q_{sky} = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \alpha_r(\lambda, \theta) I_s(\lambda, \theta, T) \sin(2\theta) d\theta d\lambda \quad (4)$$

On $I_s(\lambda, \theta, T)$ representa la potència de radiació direccional espectral de l'atmosfera; $\alpha_r(\lambda, \theta)$ és l'absorció direccional espectral del radiador, la qual pot ser substituïda per la emissivitat direccional espectral del radiador $e_r(\lambda, \theta, \varphi, T_r)$ basada en la llei de Kirchhoff.

Segons estudis anteriors, hi ha diferents mètodes basats en diferents punts de vista on aplicar i desenvolupar l'equació (4) els quals es resumeixen a continuació:

- **Dependents espectrals i direccionals**

En aquest punt de vista, s'assumeix que la propietat radiativa de l'atmosfera terrestre és espectral i direccionalment dependent.

Aquest és un mètode bàsic i de precisió fiable per avaluar la radiació infraroja del cel, però a causa de la complexitat de l'efecte dels diferents gasos sobre la propietat radiativa de l'atmosfera i la seva dificultat de càlcul en el model teòric, les correlacions relacionades de l'emissivitat atmosfèrica del cel, presentades en la Taula 1, són limitades [8].

Taula 1: Resum de correlacions d'emissivitat de l'atmosfera dependent espectral i direccional [8]

Autors	Any	Correlacions	Anotacions
Granqvist et al.	1981	$e_s(\lambda, \theta) = 1 - [1 - \varepsilon_s(\lambda, 0)]^{1/\cos\theta}$	$e_s(\lambda, 0)$ és la emissivitat de l'atmosfera en direcció vertical
Raman et al.	2014	$e_s(\lambda, \theta) = 1 - [\tau_s(\lambda, 0)]^{1/\cos\theta}$	$\tau_s(\lambda, 0)$ és la transmitància de l'atmosfera en direcció vertical
Zhu et al.	2014		
Bao et al.	2017		
Li et al.	2017		
Lushiku et al.	1982	$e_s(\lambda, \theta) = \begin{cases} 1 & (\lambda < 8\mu m, \lambda > 13\mu m) \\ 1 - [1 - \varepsilon_s(0)]^{1/\cos\theta} & (8\mu m < \lambda < 13\mu m) \end{cases}$	$e_s(0)$ és l'emissivitat total atmosfèrica
Lushiku et al.	1984		
Berdahl et al.	1983	$e_s(\lambda, \theta) = 1 - (1 - e_s)[\tau_s(\lambda, 0)/\tau_{average}]e^{1.7b-b/\cos\theta}$	$\tau_{average}$ és la transmitància mitjana de l'atmosfera; b es un paràmetre empíric

- **Independent de l'espectre i de la direcció**

Si s'assumeix que la radiació infraroja de l'atmosfera és independent tant de l'espectre com de la direcció, la radiació infraroja de l'atmosfera pot ser simplificada i la seva potencia fàcilment obtinguda. Basant-se amb la primera llei de la termodinàmica, es poden fer dues aproximacions:

- Assumir que l'atmosfera actua com a un cos negre (emissivitat efectiva $e_{sky} = 1$) i a una temperatura efectiva (T_{s-eff}) i que és doncs, basat en la llei d'Stefan-Boltzmann, igual a la radiació infraroja provinent de l'atmosfera:
Obtenint: $I_s(\lambda, \theta, T) = I_b(T_{s-eff})$

$$q_{sky} = \sigma \cdot T_{s-eff}^4 \quad (5)$$

- Assumir l'atmosfera a una temperatura ambient (T_a) i amb una emissivitat efectiva (e_{s-eff}) que equival a la radiació infraroja provinent del cel segons la llei d'Stefan-Boltzmann:
Obtenint: $I_s(\lambda, \theta, T) = e_{s-eff} I_b(T_a)$

$$q_{sky} = e_{s-eff} \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (6)$$

Aleshores, d'acord amb la primera llei de la termodinàmica i combinant les dues aproximacions, la relació entre la temperatura efectiva de l'atmosfera, la temperatura ambient i l'emissivitat es pot expressar de la següent manera:

$$T_{s-eff} = (e_{s-eff})^{1/4} T_a \quad (7)$$

La radiació provinent de l'atmosfera pot ser mesurada amb equipament especialitzat com ara un pirgeòmetre, el qual proporciona molta informació. També es pot aproximar a través de correlacions relatives a la temperatura efectiva i l'emissivitat i de la pròpia radiació del cel en mètodes semi empírics fins a teòrics i experimentals. En la taula següent es resumeixen aquestes correlacions.

Taula 2: Resum de les correlacions de la radiació atmosfèrica [8]

Autors	Any	Correlacions	Anotacions
Brunt	1932	$E_S = (C_1 + C_2 e_a^{1/2}) \sigma T_a^4$	e_a : pressió de vapor d'aigua, [mb]
Angstrom	1936	$E_S = (C_1 + C_2 10^{-C_3 e_a}) \sigma T_a^4$	C_1, C_2, C_3 : coeficients empírics dependents de la regió
Bliss	1961	$e_{s-eff} = 0.8004 + 0.00396 T_{dp}$	T_{dp} : Temperatura del punt de gel, [C°]
Swinbank	1963	$E_S = -17.09 + 1.195 \sigma T_a^4$	Basat en les mesures del cel a Benson and Kerang
Idso et al.	1963	$E_S = 5.31 \times 10^{-14} T_a^6$	
	1969	$e_{s-eff} = 1 - 0.261 e^{-0.00077(273-T_a)^2}$	Basat en mesures d'Alaska i Arizona
Staley et al.	1972	$e_{s-eff} = C_1 e^{C_2}$	Coeficients empírics a pressió atmosfèrica estàndard: $C_1 = 0.67$ i $C_2 = 0.08$
Idso	1981	$e_{s-eff} = 0.7 - 0.0000595 e_a e^{(1500/T_a)}$	
Berdahl et al.	1982	$e_{s-eff} = \begin{cases} 0.741 + 0.0062 T_{dp} \text{ (nit)} \\ 0.727 + 0.0060 T_{dp} \text{ (dia)} \end{cases}$	Basat en mesures de Tucson, Arizona, Maryland i Missouri
	1984	$e_{s-eff} = 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(t)$	t : hora solar, [h]
Berger et al.	1984	$e_{s-eff} = 0.770 - 0.0038 T_{dp}$	Basat en mesures de Frence
Martin et al.	1984	$e_{s-eff} = \varepsilon_{clear sky} + (1 - \varepsilon_{clear sky}) F$	$\varepsilon_{clear sky}$: emissivitat del cel en condicions sense núvol F : factor integral d'enuvolat
Sugita et al.	1993	$E_S = E_{clear sky} (1 + 0.0496 m^{2.45})$	$E_{clear sky}$: radiació del cel sota condicions de cel clar m : nuvolositat
Chen et al.	1995	$e_{s-eff} = 0.736 + 0.00571 T_{dp} + 3.3318 \times 10^{-6} T_{dp}^2$	Basat en mesures de Bennington, Nebraska
Niemela	2001	$e_{s-eff} = \begin{cases} 0.72 + 0.009(e_a - 2) & (e_a \geq 2) \\ 0.72 - 0.076(e_a - 2) & (e_a < 2) \end{cases}$	e_a : pressió de vapor d'aigua, [hpa] Basat en mesures de Sodankyla, Finlàndia
Tang et al	2004	$e_{s-eff} = 0.754 + 0.0044 T_{dp} \text{ (nit)}$	Negev Highlands
Lhomme et al	2007	$e_{s-eff} = 1.18 (e_a/T_a)^{1/7}$	
	2007	$e_{s-eff} = \varepsilon_{clear sky} (1.37 - 0.34 S)$	S : relació entre la radiació solar dels dies ennuvolats amb els clars
Sicart et al.	2010	$e_{s-eff} = C_1 (e_a/T_a)^{1/m} F$	

- **Dependents de l'espectre però independents a la direcció**

Des d'aquest criteri, la propietat de radiació de l'atmosfera és espectralment selectiva.

Generalment, l'estudi de la radiació infraroja des d'aquest punt de vista és més simple que en el cas dependent espectral i direccionalment, però és més complex que en el cas anterior. Actualment però, l'estat dels estudis i la literatura sobre aquest camp són limitats i poc precisos raó per la qual no és dilatarà l'explicació del mateix.

D'aquests punts de vista descrits, el més realista és el primer, dependent espectral i direccionalment. Considera el fet que l'atmosfera actua com a un medi semi-transparent que relaciona l'espectre i l'angle de radiació. Aquest mètode ha estat reconegut com a descripció universal de la radiació infraroja de l'atmosfera i ha estat molt utilitzat en els estudis més recents sobre la refrigeració per radiació.

No obstant, en el cas que ocupa aquest projecte, el valor de la radiació infraroja del cel (q_{sky}) que s'utilitzarà en l'experimentació i els càlculs posteriors s'extreu de les dades preses per l'equipament especialitzat, el pirgeòmetre.

- **Pirgeòmetre**

Un pirgeòmetre és un instrument per a mesurar l'espectre de la radiació infraroja en l'atmosfera, que s'estén de 4,5 a 100 μm .

Aquest instrument té una sensibilitat diferent per a les radiacions d'ona curta i d'ona llarga. Està dissenyat tant per a la investigació de proves de materials com per a aplicacions atmosfèriques.

Les radiacions d'ona llarga són emeses per tots els objectes existents en la Terra. No obstant, el propòsit principal d'un pirgeòmetre és realitzar l'observació meteorològica de la radiació atmosfèrica i de la radiació neta entre la terra i l'atmosfera.

Principi de funcionament:

El pirgeòmetre funciona segons el principi de que l'energia radiant es converteix en energia tèrmica, que pot ser mesurada per una termopila.

Aquest instrument consisteix en una cúpula de silici per a aïllar la radiació d'ona llarga de la radiació solar d'ona curta durant el dia. També inclou un filtre d'interferències amb un rang de transmissió d'aproximadament 3,5 a 50 μm , i una caixa blindada per a minimitzar el escalfament de l'instrument degut a la radiació solar.

S'utilitzen termistors per a vigilar les temperatures de la cúpula, la caixa i la radiació infraroja tèrmica ambiental.

Un detector revestit amb una pintura negra detecta un senyal net de diferents fonts, incloses les emissions de la cúpula, la caixa i els objectius en el seu camp de visió.

La radiació entrant és absorbida pel detector i la calor flueix a través del cos de l'instrument. El gradient tèrmic a través de la termopila crea un voltatge que és relatiu a la radiació neta.

El rang espectral de la radiació entrant està restringit pel filtre que elimina la radiació solar no desitjada. Per tant, la radiació infraroja tèrmica pot mesurar-se en watts per metre quadrat.

Com que la caixa està protegida de la radiació solar, la seva temperatura es considera com la de la temperatura ambient, el que proporciona el grau d'emissió tèrmica de l'atmosfera.



Figura 2: Pirgeòmetre comercial. Font:[9]

4.2. Energia solar tèrmica i captadors solars tèrmics

La radiació solar és el conjunt d'ones electromagnètiques emeses pel sol que arriben a la terra amb una potència d'uns 1353 W/m^2 .

Aproximadament la meitat de la radiació solar que arriba a l'atmosfera de la terra pertany a la franja de freqüències de llum visible per l'ull humà (de $0,38$ a $0,78 \mu\text{m}$) i la resta, que no pot ser captada per els nostres ulls, es divideix entre radiació infraroja (amb longituds d'ona superiors a $0,78 \mu\text{m}$) i l'ultraviolat (amb longituds d'ona inferiors a $0,38 \mu\text{m}$).

Després del seu pas per l'atmosfera, la radiació solar es debilita degut a l'absorció i la difusió que produeixen els gasos i les partícules de l'atmosfera (Figura 3), així doncs, la radiació solar incident sobre la superfície terrestre no acostuma a superar els 1000 W/m^2 (valor estàndard de referència de radiació solar) depenent del lloc, l'hora del dia, època de l'any i estat del cel [10].

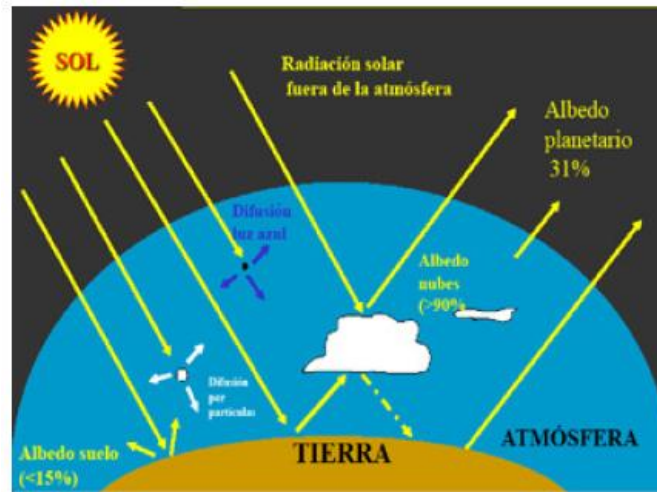


Figura 3: Esquema de l'efecte de l'atmosfera terrestre sobre la radiació solar. Font: [10]

L'energia solar tèrmica consisteix en aprofitar en forma de calor aquesta radiació solar rebuda.

Una forma d'aprofitament actiu d'aquesta energia solar tèrmica fa referència a sistemes que capturen la radiació i transfereixen la calor generada a un sistema d'utilització o d'emmagatzematge.

Per tal d'aprofitar aquesta energia s'utilitza l'anomenat captador solar tèrmic que normalment consisteix en una placa plana formada per un absorbidor, una graella de tubs pels quals hi circula el fluid que és vol escalfar i una coberta de vidre que produeix l'efecte hivernacle sobre l'absorbidor.

La producció d'aigua calenta sanitària és l'aplicació de l'energia solar tèrmica més comú i és la que la instal·lació experimental que és descriurà en futurs apartats pretén imitar.

Aquesta aigua calenta es pot aprofitar en l'habitatge tant de forma directa com indirecta en el suport de la calefacció, aigua calenta per a la dutxa o escalfament de piscines...

5. Cas d'estudi

5.1. Prototip RCE 2017

Tal i com s'ha esmentat anteriorment en aquest projecte, l'estudi fet per Vall et al. 2018 va dur a terme un experiment per validar el model teòric que havien realitzat.

Aquest experiment va consistir en un col·lector solar i un refrigerador radiant, cada un amb el seu dipòsit i la seva instal·lació corresponent monitoritzada amb diferents sensors de temperatura i cabalímetres, juntament amb un pirgeòmetre i un sistema d'adquisició de dades.

El refrigerador radiant era un col·lector solar del mateix tipus que el primer però al que se li havia reemplaçat la coberta de vidre per una de Polietilè (PE) de 0,6 mm de gruix i se li havia aplicat una capa de pintura negra per adaptar-lo a les característiques necessàries per al mode de radiació nocturna.



Figura 4: Col·lector solar per al mode diürn a l'esquerra i refrigerador radiant per al mode nocturn a la dreta

Tal i com es pot observar en la Figura 4, els dos dispositius varen ser col·locats un al costat de l'altre en posició plana a la coberta de l'edifici CREA de la universitat de Lleida.

L'esquema de la instal·lació experimental es pot observar en la Figura 5 on també hi són indicats la posició dels sensors de temperatura i els cabalímetres.

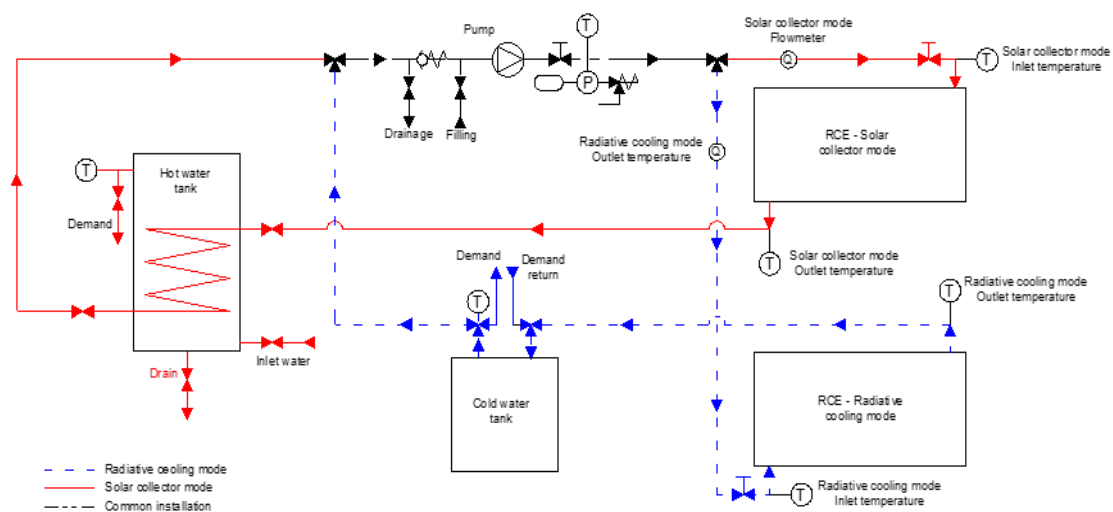


Figura 5: Esquema de la instal·lació de l'experiment del 2017

Aquest experiment va ser executat durant l'estiu del 2017, concretament durant 2 períodes, del 26 al 28 de juliol i del 31 de juliol al 4 d'agost. Durant el dia entrava en funcionament el dispositiu diürn, el col·lector solar i durant la nit el dispositiu nocturn, el refrigerador radiant.

5.2. Prototip RCE 2019

Aquest prototip parteix d'un col·lector solar tèrmic comercial de 2 m² de superfície, les característiques del qual es detallen en l'Annex I, al que se li han aplicat una sèrie de modificacions per al mode de refrigeració nocturn.

La principal diferència entre el mode de col·lector solar diürn i del refrigerador nocturn és la coberta. Durant el dia utilitza la coberta de vidre pròpia del col·lector solar, però per al mode nocturn, aquesta coberta es retira i deixa al descobert una segona coberta de film de polietilè de 0,6 mm de gruix el qual té una millor transmissivitat en la zona infraroja d'ona llarga.

Gràcies a una càmera infraroja es comprova en la Figura 6 que el vidre del col·lector solar comercial és un vidre especial que no transmet la radiació infraroja per a poder potenciar l'efecte hivernacle i augmentar l'eficiència del col·lector.

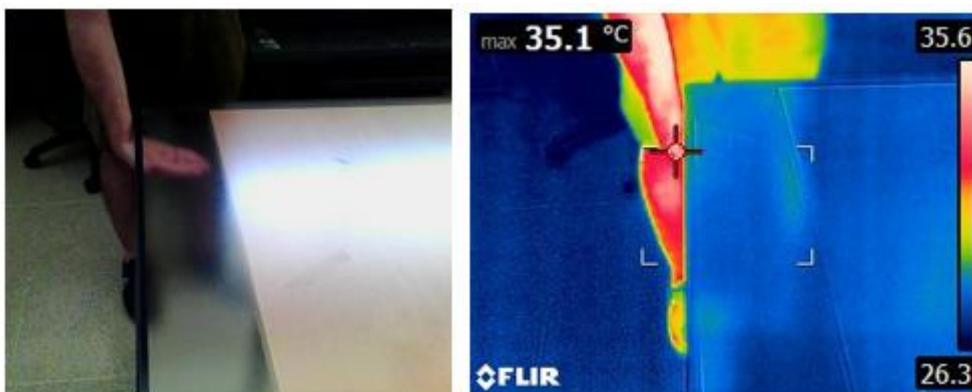


Figura 6: Bloqueig de la radiació infraroja de la coberta de vidre del col·lector comercial

Un altra modificació a tenir en compte ha estat en l'absorbidor original del captador solar. S'hi han aplicat dues capes d'una pintura negra altament absorbent i emissora en la franja infraroja per a poder aproximar les condicions del prototip a les de un cos negre.

Amb la càmera infraroja es pot comprovar experimentalment que l'absorbidor original reflectia bona part de la radiació rebuda en aquesta zona de l'espectre electromagnètic (Figura 7) i la important reducció de la reflexió del captador un cop aplicades les capes d'aquesta pintura especial (Figura 8)

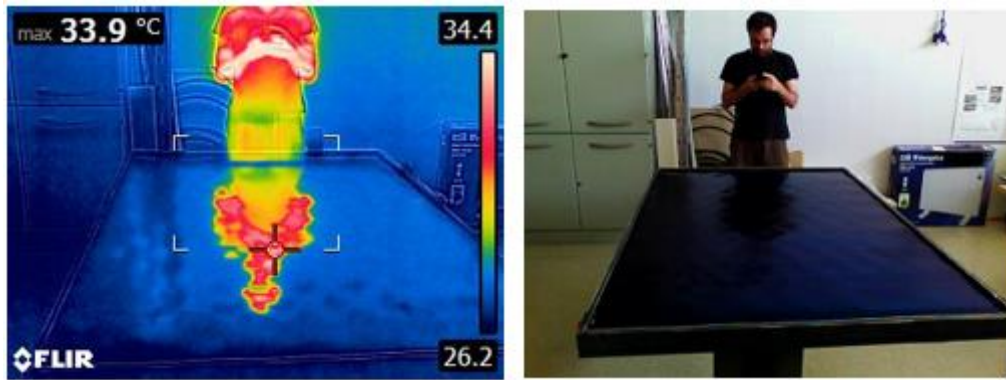


Figura 7: Alta reflectivitat de l'absorbidor original del col·lector

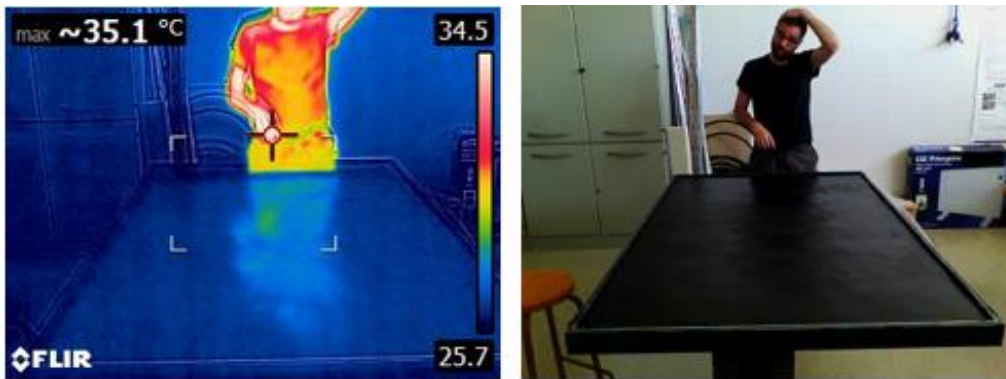


Figura 8: Reducció de la reflectivitat de l'absorbidor després de les capes de pintura

En l'experimentació anterior es va comprovar que el film de polietilè, amb el pas del temps, perdia rigidesa i tocava directament la superfície de l'absorbidor afectant així el funcionament de la refrigeració radiant doncs hi ha transferència de calor per conducció a causa del contacte.

És per aquest motiu que es va decidir col·locar una graella feta amb fils de niló per evitar aquest contacte (Figura 9)



Figura 9: Graella de fils de niló i la posterior col·locació del film de polietilè

Per a facilitar la retirada de la coberta de vidre, s'han instal·lat un marc d'alumini on s'hi emplaça la coberta de vidre original i unes guies en la estructura del col·lector amb la coberta de niló ja instal·lada que, gràcies a unes rodes de plàstic dissenyades expressament i impreses en 3D permet desplaçar la coberta de vidre a un lateral fàcilment quan entra en funcionament el mode nocturn (Figura 10)



Figura 10: Instal·lació de les guies en l'estructura del col·lector

Per a protegir la graella de fils de niló del moviment del marc i aïllar-la per evitar pèrdues per convecció, els perfils interiors dels marc han estat coberts amb una goma espuma adhesiva negra.

En la Figura 11 es pot observar el resultat final del prototip amb les modificacions descrites



Figura 11: Instal·lació del prototip RCE en la teulada del edifici CREA

5.3. Instal·lació experimental

La instal·lació construïda per a dur a terme l'experimentació del RCE, ha estat dissenyada per a que les proves de funcionament s'aproximin a les condicions reals que es trobarien en un habitatge i parteix de la instal·lació experimental del prototip anterior de l'any 2017 que també ha estat modificada per adaptar-se a l'estudi actual.

Aquesta instal·lació consta d'un circuit per al mode de funcionament diürn i un altre circuit per al mode de refrigerador radiant nocturn els qual es descriuen en l'esquema de la Figura 12.

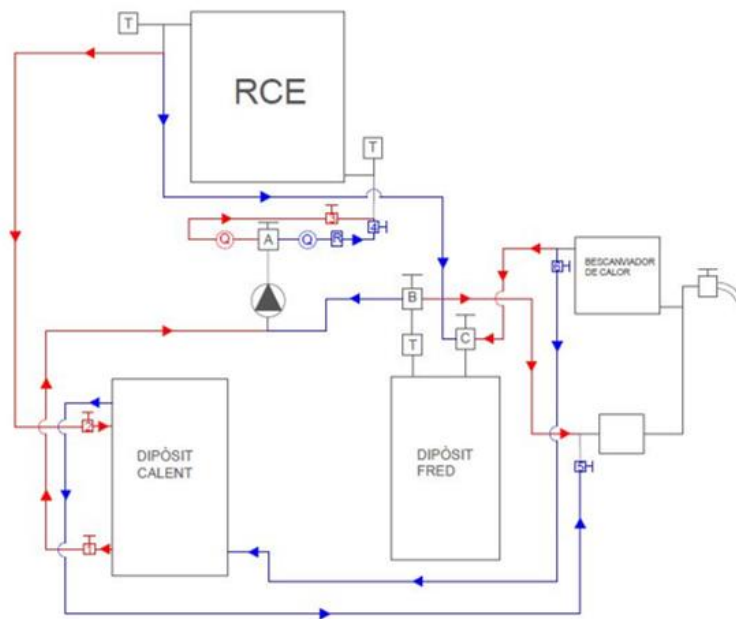


Figura 12: Esquema de la instal·lació experimental

Circuit mode diürn: Col·lector solar

En vermell s'indica el recorregut de l'aigua escalfada en el col·lector solar que va cap al dipòsit d'aigua calenta i que, a través d'una canonada en "serpentina", calenta indirectament l'aigua del dipòsit i que retorna al col·lector gràcies a la unitat de bombeig.

També s'hi indica el circuit d'aigua escalfada al tanc que va cap a l'intercanviador de calor aigua-aire per a poder refredar aquesta aigua fins a temperatura ambient i poder començar l'experimentació del dia següent en les mateixes condicions que l'anterior.

Circuit mode nocturn: Refrigerador radiant

En color blau es pot observar el recorregut de l'aigua refredada durant el mode de refrigeració radiant nocturn. A diferència del circuit diürn, en aquest cas, l'aigua que entra i surt del RCE és l'aigua emmagatzemada en el dipòsit d'aigua freda, aconseguint així un refredament directe d'aquesta aigua.

També està indicada la possibilitat d'escalfar l'aigua refredada durant la nit en l'intercanviador de calor aigua-aire, igual que en el cas del circuit del mode diürn, per a poder treballar en les mateixes condicions en la següent nit d'experimentació.

En la taula següent s'enumeren els components principals de la instal·lació experimental:

1 RCE	SOL 200 – BAXI: Col·lector solar tèrmic de 2 m ²
1 Dipòsit aigua calenta	150 L
1 Dipòsit aigua freda	50 L
5 Sensors de temperatura	3 PT-10 amb precisió de 0,045°C: per la temperatura de l'aigua a l'entrada i sortida del RCE i la temperatura ambient
2 Cabalímetres	Badger Meter – Primo Advanced , 0.25% de precisió: per al circuit del mode diürn Schmidt Mess –SDNC 503 GA-20 , 4% de precisió: per al circuit del mode de radiació nocturna.
1 Mesurador de radiació infraroja	LP PIRG 01 –DeltaOhm , precisió del 5%: Pirgeòmetre
1 Mesurador de radiació solar horitzontal	KIPP & ZONEN CMP 6 (±2,50% de error): Solarímetre
Sistema d'adquisició de dades controlat per ordinador	TCS-01, de Step S.L.
Vàlvules regulació del pas de l'aigua	
Purgadors d'aire	
Grup de bombeig	
Intercanviador de calor	

Taula 3: Resum dels components principals de la instal·lació experimental

Les especificacions tècniques de cada un dels components són detallades en l'Annex I.

5.4. Experimentació

Un cop dissenyat i construït el prototip RCE i la instal·lació, es munta a la coberta de l'edifici CREA de la Universitat de Lleida a la mateixa ciutat de Lleida.

El prototip ha estat muntat de forma horitzontal per a optimitzar la radiació al cel tot i saber que aquesta configuració pot afectar la producció d'aigua calenta durant el dia ja que la posició òptima per al mode diürn és orientada al sud i inclinació similar a la latitud de Lleida, uns 41°.

Es prepara la instal·lació per a la posada en funcionament del circuit introduint l'aigua tant en els dipòsits com en les canonades. A continuació es procedeix a purgar d'aire i detectar i eliminar les fuites que s'hi han trobat. També es comproven les lectures dels diferents sensors a l'ordinador i s'ajusten fins que donen un resultat correcte.

Els experiments varen començar el dia 11 de juliol del 2019 i es van donar per finalitzats el dia 16 d'agost del mateix any, obtenint doncs 36 dies de dades.

El procés d'experimentació va seguir un ordre diari que consistia en activar el funcionament del mode de col·lector solar entre les 8 i les 9 del matí el qual treballa durant tot el dia i activar el mode de refrigerador radiant entre les 8 i les 9 del vespre perquè treballi fins al matí següent. D'aquesta manera es van obtenir 12 hores de dades de cada un dels modes de funcionament.

El canvi de mode de funcionament es feia de manera manual retirant la coberta de vidre al vespre deixant la de polietilè al descobert i col·locant-la de nou sobre el RCE al matí.

També es canviava el circuit d'aigua en moviment gràcies a les vàlvules que regulen el pas a un dipòsit o l'altre depenent del mode de funcionament.

Es va establir un període de transició entre un mode i un altre per a refredar o escalfar l'aigua dels dipòsits acumuladors per tal de començar els experiments amb les mateixes condicions cada dia, aigua a temperatura ambient, per simular la situació real de demanda d'aigua. Aquest període comprèn dues hores durant les quals es fa el canvi de mode tenint així una durada de 10 hores en funcionament de col·lector solar, des de les 9.30 h a les 19.30 h, i una durada de 10 hores en funcionament de refrigerador radiant, de les 21.30 h a les 7.30 h del dia següent.

Es va mantenir el mateix procediment al llarg de tota la fase d'experimentació tant en el mode diürn com en el nocturn tot i que es va fer algunes petites modificacions per a millorar el procés de presa de dades o observar millores en la productivitat del prototip.

Aquestes variacions consistien en:

- Modificar lleugerament el cabal d'aigua duran el mode nocturn (de 0.8 a 1.8 L/min)
- Evitar el funcionament diürn de captació solar durant diferents dies
- Desactivar el funcionament de l'intercanviador de calor alguns dies per evitar l'escalfament de l'aigua refredada durant la nit.

Al llarg de tot el procés d'experimentació es va anotar, en forma de diari, els detalls de la posada en marxa de cada mode de treball cada dia com l'hora exacta del canvi, si es va aplicar, o no, alguna de les variacions descrites anteriorment i la nuvolositat del període, classificant-lo com dia clar o nuvolós.

En l'Annex II es troba la taula resum amb les dades diàries juntament amb el diari detallat de cada un dels dies d'experimentació.

El sistema de captació de dades emmagatzemava les dades dels sensors minut a minut en format .CSV.

Cada matí, després de fer el canvi manual del mode de funcionament, les dades de la nit i el dia anterior eren exportades al programa Microsoft Excel i es guardaven amb el nom RCE-IR en format .xls per a poder tractar-les.

Les dades obtingudes directament de la instal·lació experimental són les següents:

- **Radiació neta al pirgeòmetre** [W/m²]
- **Temperatura exterior** [°C]
- **Temperatura d'entrada i sortida del RCE** [°C]
- **Temperatura dels dipòsits d'aigua** [°C]
- **Radiació solar** [W/m²]
- **Cabals volumètrics** [L/min]

5.5. Tractament de les dades

Per al càlcul de la radiació infraroja rebuda de l'atmosfera (q_{sky}), mitjançant les dades obtingudes en la instal·lació, es necessita la temperatura del pirgeòmetre tal com es pot observar en l'expressió següent:

$$q_{sky} = q_{net_pyr} + \sigma \cdot T_{pyr}^4 \quad (8)$$

On:

q_{net_pyr} : Radiació neta mesurada en el pirgeòmetre [$W \cdot m^{-2}$]

σ : Constant de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$)

T_{pyr} : Temperatura al pirgeòmetre (K) obtinguda a partir de la lectura de la resistència del NTC i aplicant les taules i el mètode especificat en el manual d'usuari del pirgeòmetre (Annex I)

Un cop obtinguda la radiació provinent de l'atmosfera, sabent que és la mateixa que rep el prototip RCE, es calcula el balanç net en aquest que es defineix de la següent manera:

$$q_{net_RCE} = q_{sky} - q_{out_RCE} \quad (9)$$

On:

q_{net_RCE} : Radiació neta calculada a l'RCE [$W \cdot m^{-2}$]

q_{out_RCE} : Radiació irradiada per l'RCE [$W \cdot m^{-2}$]

Aquesta última radiació es pot calcular mitjançant l'equació 10 utilitzant la temperatura del RCE (T_{RCE}).

$$q_{out_RCE} = \sigma \cdot T_{RCE}^4 \quad (10)$$

On:

T_{RCE} : Temperatura al RCE obtinguda a partir de la mitjana de les temperatures llegides pels sensors a l'entrada i a la sortida del prototip [K]

Relacionant aquestes equacions, el balanç net de radiació en l'RCE s'obté de la següent manera:

$$q_{net_RCE} = q_{sky} - \sigma \cdot T_{RCE}^4 \quad (11)$$

Degut a que el sistema de presa de dades produïa una línia de dades per minut, es van obtenir més de 47 mil línies de dades en un arxiu Excel, fet que feia difícil la tasca de

càlculs i revisió d'aquestes. Per a facilitar la manipulació de les dades es va calcular la mitjana de cada mitja hora i es va separar per setmanes obtenint així 6 arxius excels:

- Setmana 1: del 11 al 14 de juliol
- Setmana 2: del 15 al 21 de juliol
- Setmana 3: del 22 al 28 de juliol
- Setmana 4: del 29 de juliol al 4 d'agost
- Setmana 5: del 5 al 11 d'agost
- Setmana 6: del 12 al 16 d'agost

Un cop fetes les mitjanes s'avalua la potència produïda tant en el mode de captació solar com en el de refrigerador nocturn amb l'equació següent:

$$P_{total_RCE} = \rho \cdot Cp \cdot v \cdot \Delta T_{RCE} \quad (12)$$

On:

P_{total_RCE} : és la potència total del dispositiu [W]

ρ : és la densitat del fluid [kg/m³]

Cp : és la capacitat calorífica del fluid [kJ/kg·K]

v : cabal volumètric [m³/s] obtingut de la lectura del cabalímetre de la instal·lació

ΔT_{RCE} : és la variació de temperatura del fluid a l'entrada i sortida del dispositiu [K] obtingudes directament dels sensors de temperatura de la instal·lació.

Després d'obtenir la potència produïda en el RCE es calcula la potència produïda per metre quadrat (P_{RCE}) en [W/m²] mitjançant l'equació 13, on A és la superfície, en aquest cas 2 metres quadrats.

$$P_{RCE} = \frac{P_{total_RCE}}{A} \quad (13)$$

Amb les potències calculades es procedeix a calcular les eficiències per a cada mode de funcionament amb l'equació 14 per al mode de col·lector solar i l'equació 15 per al mode de refrigerador radiant:

$$\eta_{collector} = \frac{P_{RCE}}{Rad_solar} \quad (14)$$

$$\eta_{refrigerador} = \frac{P_{RCE}}{|q_{net_RCE}|} \quad (15)$$

On:

Rad_solar : és la radiació solar provinent del cel durant el dia [W/m²]

$\eta_{collector}$: és l'eficiència diürna en el mode de col·lector solar

$\eta_{refrigerador}$: és l'eficiència en el mode nocturn de refrigerador radiant

6. Resultats i Comparació

En aquesta secció es resumeixen els resultats obtinguts tant de les dades mesurades directament en la instal·lació experimental com dels càlculs fets posteriorment amb aquestes dades. També es comparen amb els resultats obtinguts de l'anterior experiment del 2017.

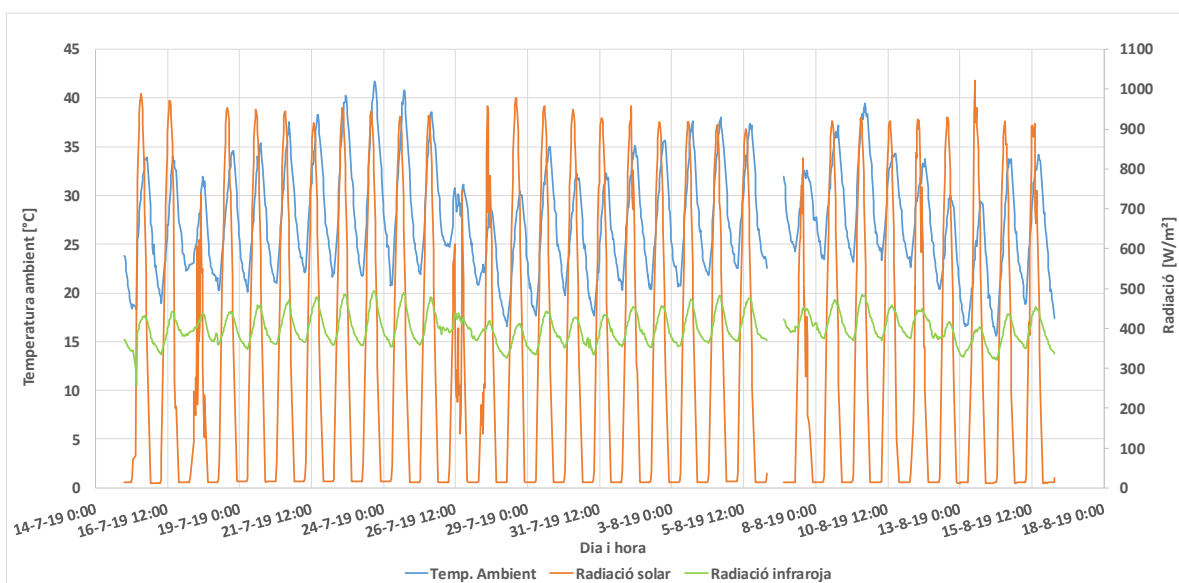
6.1. Resultats experimentació 2019

Condicions climàtiques

Cal esmentar que, durant els primers dies, moltes de les dades recollides no tenien sentit i el sistema de presa de dades donava error doncs alguns dels sensors es van haver d'ajustar i es van localitzar i solucionar els diferents problemes en el funcionament correcte de la instal·lació. És per aquesta raó que es decideix desestimar els resultats de la que es considera la setmana 1 (del 11 al 14 de juliol) ja que no es tenen dades des del dia 12 al matí fins al dia 14. Els resultats mostrats en aquesta secció es tracten doncs d'aquells obtinguts a partir del dia 15 de juliol fins al dia 16 d'agost.

En el Gràfic 1 s'hi mostren els valors de la temperatura ambient, la radiació solar i la radiació infraroja provinent de l'atmosfera obtinguts dels sensors de la instal·lació. Es pot observar que aquests valors corresponen als de les condicions climàtiques típiques del clima sec mediterrani continental, propi de la ciutat de Lleida, amb unes temperatures diürnes que oscil·len entre els 20 i els 40°C i temperatures nocturnes entre 16 i 30 °C. Respecte a la radiació solar es tenen valors mitjos d'uns 674 W/m² amb valors màxims de fins a 988 W/m² i de la radiació infraroja provinent de l'atmosfera els valor mitjos son d'uns 430 W/m² amb màxims de 490 W/m².

Cal remarcar també un comportament molt diferent de la radiació solar i de la infraroja dels dies 17 i 26 de juliol a la resta de dies, degut a que va ploure i va estar molt ennuvolat. També s'hi pot veure la falta de dades del dia 6 d'agost doncs hi va haver un tall en el subministrament d'electricitat durant tot el període del mode diürn.



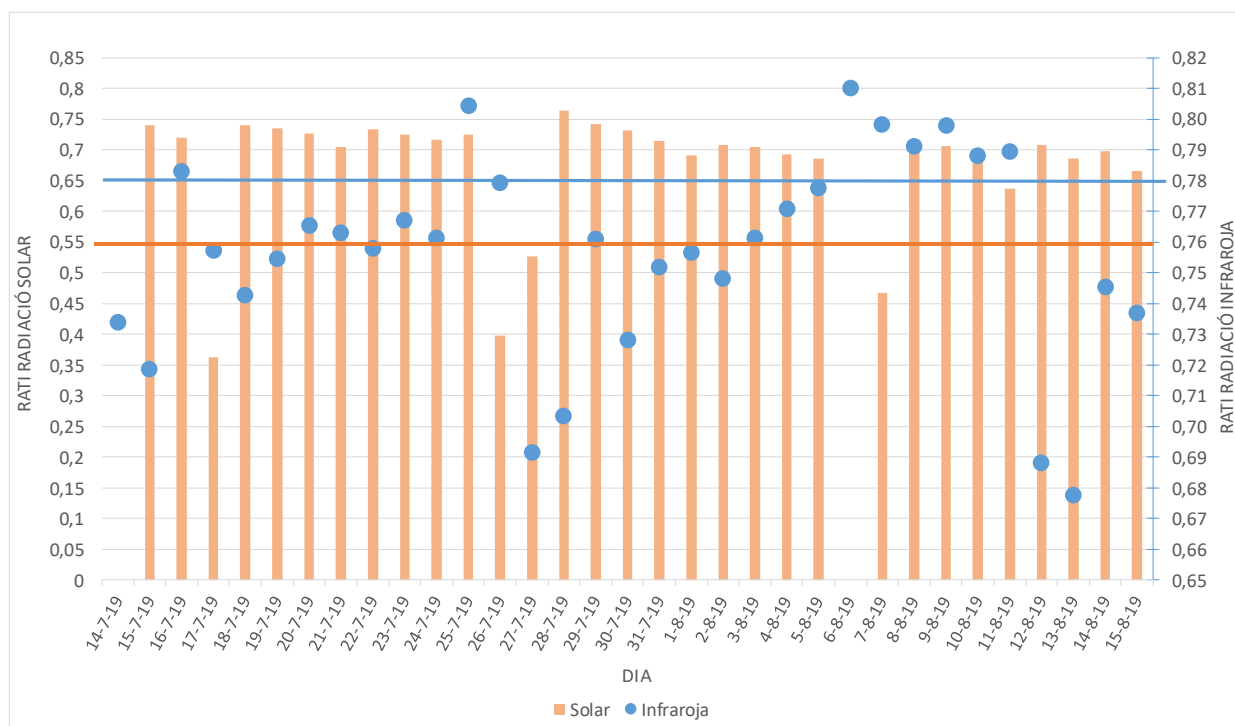
Gràfic 1: Condicions climàtiques durant l'experimentació del 2019

Per a poder veure la influència dels núvols en el funcionament tant del mode diürn com en el del nocturn es pretén classificar els dies en ennuvolats o clars, però degut a que l'estat del cel varia durant el pas de les hores i pot tenir les dues condicions durant un mateix dia o nit, no es creu convenient basar aquesta classificació en les dades obtingudes tant del diari d'experimentació com en les dades del Servei Meteorològic de Catalunya, que anoten l'estat del cel en un moment concret del dia i que no és representatiu de la resta d'hores.

És per aquesta raó que, amb la intenció d'establir un criteri més fiable per a classificar els dies i nits amb cel clar o ennuvolat s'han calculat els ratis de la radiació solar i de la radiació infraroja respecte dels seus màxims, que són de 1000 W/m^2 per la radiació solar i de 494 W/m^2 per a la infraroja.

Respecte al valor màxim de la radiació solar, s'ha utilitzat aquest valor doncs està considerat el valor típic de radiació solar màxima terrestre, però els valors màxims mesurats són d'uns 990 W/m^2 a excepció d'un dia que té un pic de 1023 W/m^2 .

En el Gràfic 1s'hi mostren les mitges diàries dels ratis de radiació solar i les mitges nocturnes dels ratis de la radiació infraroja. Els punts blaus indiquen la mitja dels ratis de la nit que comença el dia marcat a l'eix de les X, per exemple, el punt situat sobre el dia 14 de juliol és el rati de la nit del 14 al 15 de juliol.



Gràfic 2: Mitges diàries i nocturnes dels ratis de radiacions. Les línies horitzontals indiquen els valors que s'han considerat a l'hora de posar un criteri per a classificar el cel ennuvolat.

Observant els resultats es pot veure que la majoria de dies, els ratis de la radiació solar s'aproximen a 0,7 a excepció de 4 dies que queden molt per sota. D'aquests 4 dies, se sap que el dia 17 i 26 de juliol va ploure i que per tant va estar ennuvolat durant gairebé tot el dia.

Es decideix doncs, basant-se amb aquests resultats, que es consideraran ennuvolats els dies que tinguin una mitja de rati de radiació solar inferior a 0,55.

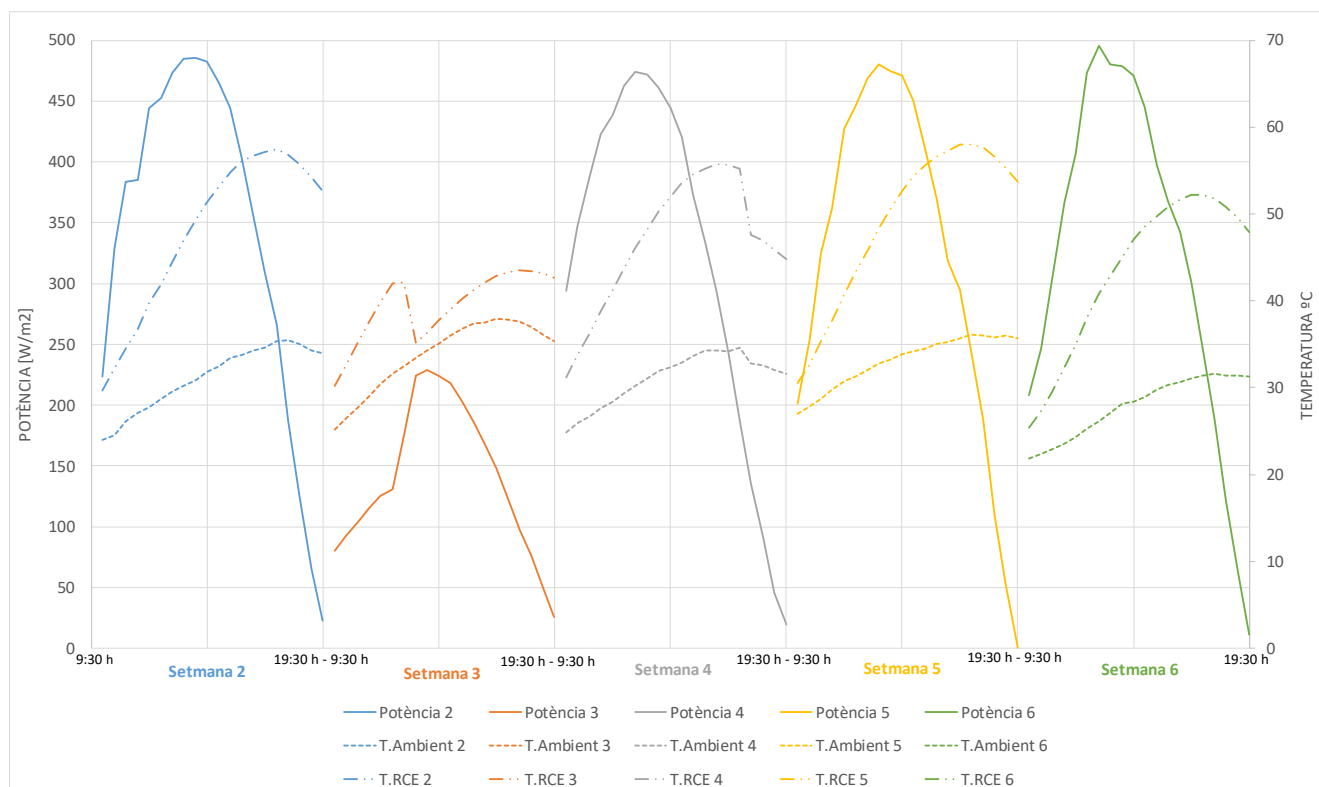
Pel que fa a la nit, les oscil·lacions de les mitges dels ratís de radiació infraroja són més petites que les diürnes però es pot veure que, coincidint amb les nits dels dies considerats ennuvolats, hi ha valors per damunt de 0,78 a diferència de les altres nits, és per això que es decideix que les nits amb ratís mitjans de radiació infraroja per sobre d'aquest valor es consideraran ennuvolades.

Aplicant aquests criteris, representats en el Gràfic 2 amb dues línies horitzontals, els dies ennuvolats són el 17, 26 i 27 de juliol i el dia 7 d'agost. Les nits ennuvolades són la nit del 16 al 17, del 25 al 26 i del 26 al 27 de juliol i les nits del 6 al 7 i de l'11 al 12 d'agost.

Mode diürn: col·lector solar tèrmic per a producció de calor

En el Gràfic 3 s'hi mostren la mitja per setmanes de les potències calorífiques calculades els dies de cel clar. Es pot observar que els resultats de cada setmana, a excepció de la setmana 3 en què en el mode diürn es va tancar el col·lector i es va fer circular l'aigua per a evitar-ne el sobreescalfament els dies assolellats, són molt semblants, amb potències mitjanes entre 317 i 340 W/m² i amb valors màxims entre 480 i 495 W/m².

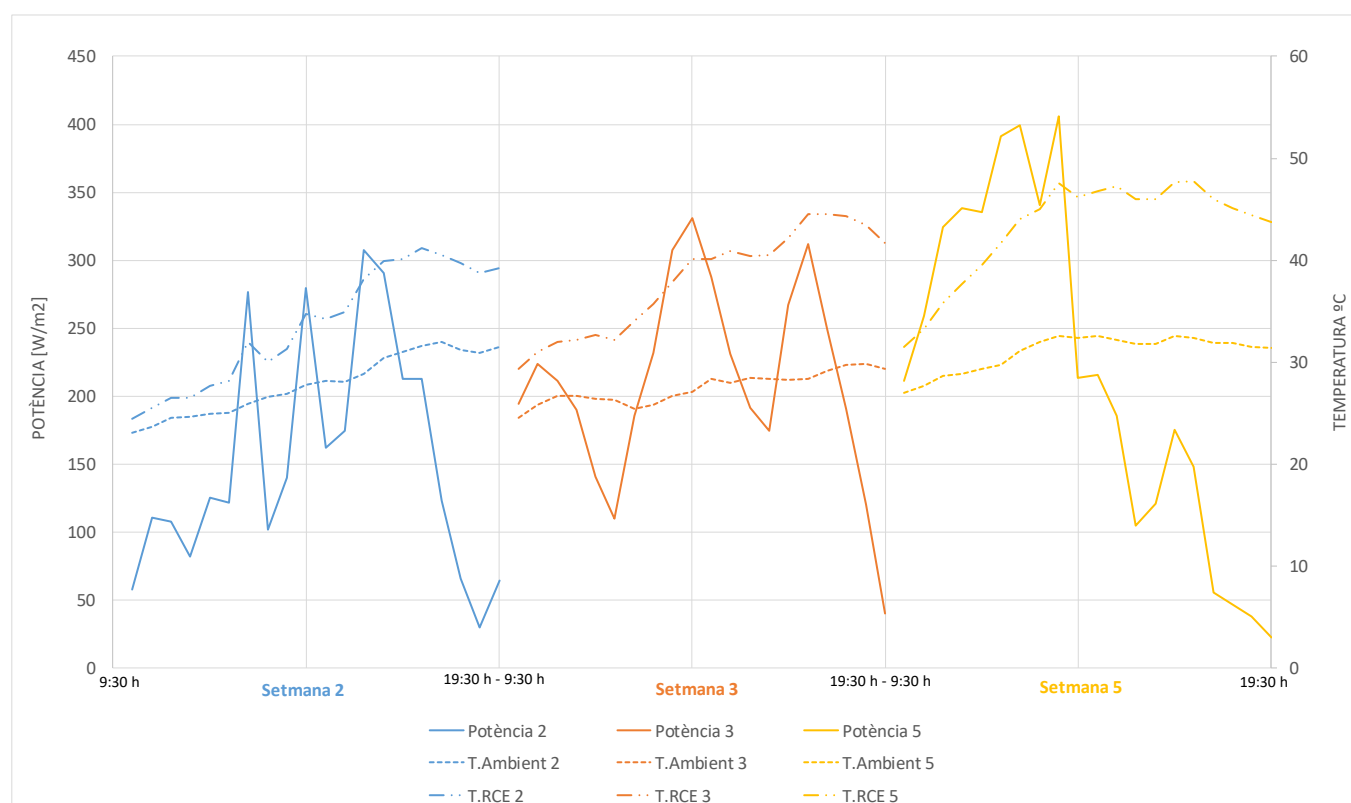
Respecte a la temperatura de l'aigua a la sortida del RCE, s'assoleix una mitja de entre 15 i 16 °C per damunt de la temperatura ambient amb valors màxims entre 21 i 23 °C.



Gràfic 3: Potències calorífiques i temperatures mitjanes en els dies amb cel clar

Pel que fa als dies amb el cel ennuvolat, que varen ser el dia 17 de juliol (Setmana 2), el 26 i 27 de juliol (Setmana 3) i el dia 7 d'agost (Setmana 5), els valors de les potències són molt més irregulars que els del cel clar com es pot observar en el Gràfic 4. Mentre que els dies amb cel clar presenten un comportament més progressiu totes les setmanes, els dies amb cel ennuvolat presenten oscil·lacions molt pronunciades, al llarg del dia. Les potències mitjanes diürnes obtingudes van entre 150 i 215 W/m², gairebé la meitat que en els dies de cel clar, i tenen valors màxims de 330 i inclús 400 W/m².

La diferència entre la temperatura ambient i la temperatura de l'aigua a la sortida del RCE també presenta valors menors que en els dies clars. Les mitges es mouen entre els 5 i 10°C i els valors màxims estan al voltant dels 15°C



Gràfic 4: Potències calorífiques i temperatures mitjanes en els dies amb cel ennuvolat

Mode nocturn: refrigerador radiant per a producció de fred

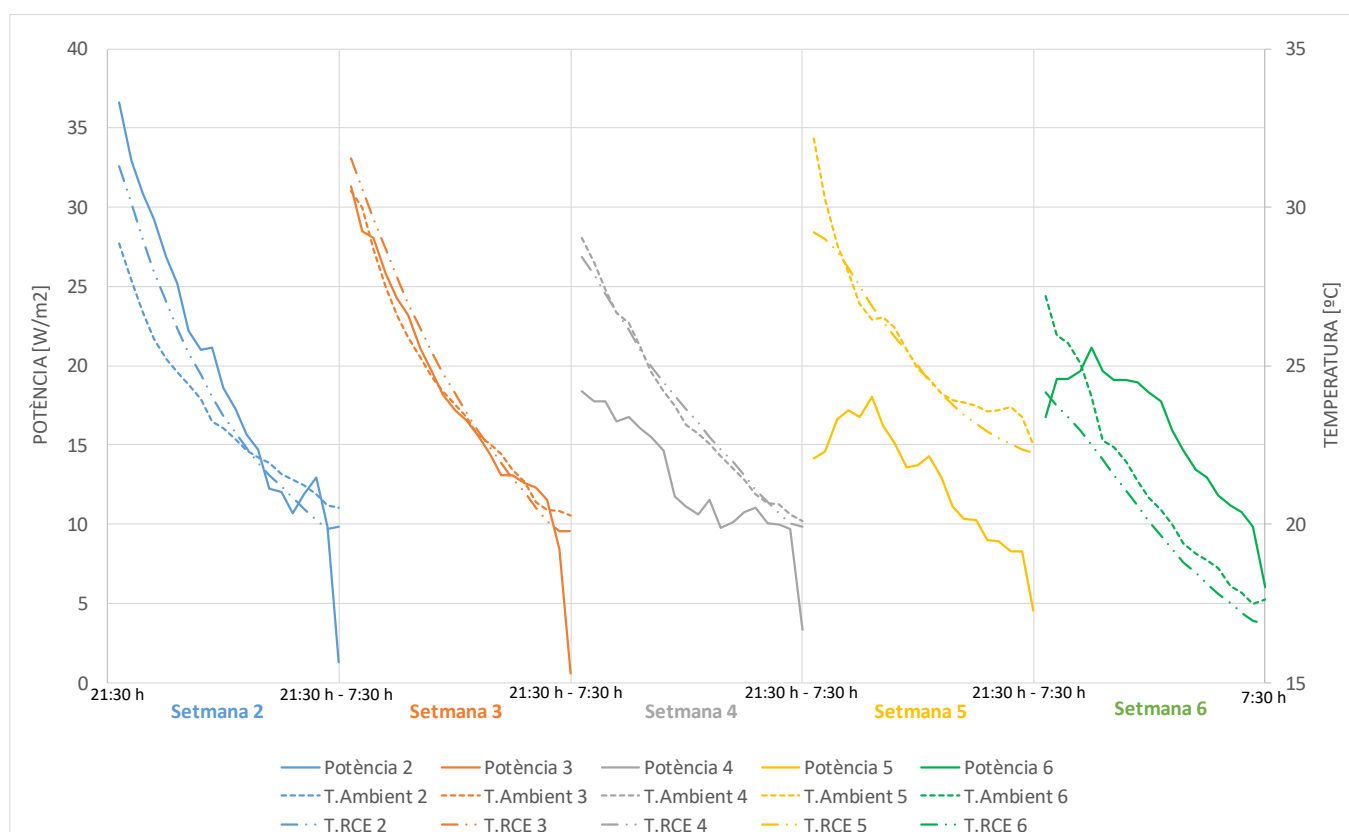
En els gràfics referents al mode nocturn, es mostren els valors absoluts de les potències frigorífiques per a poder fer-ne una lectura més comprensible.

El primer que s'ha de destacar, tant en nits ennuvolades com de cel clar, és que els valors de les potències són molt menors (gairebé una desena part) dels que s'obtenen en el mode de col·lecció solar.

En el Gràfic 5 s'hi mostren la mitjana per setmanes de les potències i les temperatures nocturnes de les nits amb cel clar.

Cal subratllar la diferència dels valors assumits durant la setmana 2 (potència mitjana de 19 W/m^2 amb valors màxims majors de 36 W/m^2) i que han anat disminuint de manera progressiva fins a valors mitjans d'uns 13 W/m^2 amb màxims de 18 W/m^2 de la setmana 5.

Aquest decreixement s'atribueix, en bona part, a l'erosió del film de polietilè i, en part també, a l'acumulació de pols i brutícia en la seva superfície. A finals de la setmana 5, es va netejar amb una tovallola electrostàtica i així s'explica el petit, però notable, augment de la potència entre la setmana 5 i la setmana 6, on s'assoleixen valors mitjos de 16 W/m^2 amb màxims majors de 21 W/m^2 .



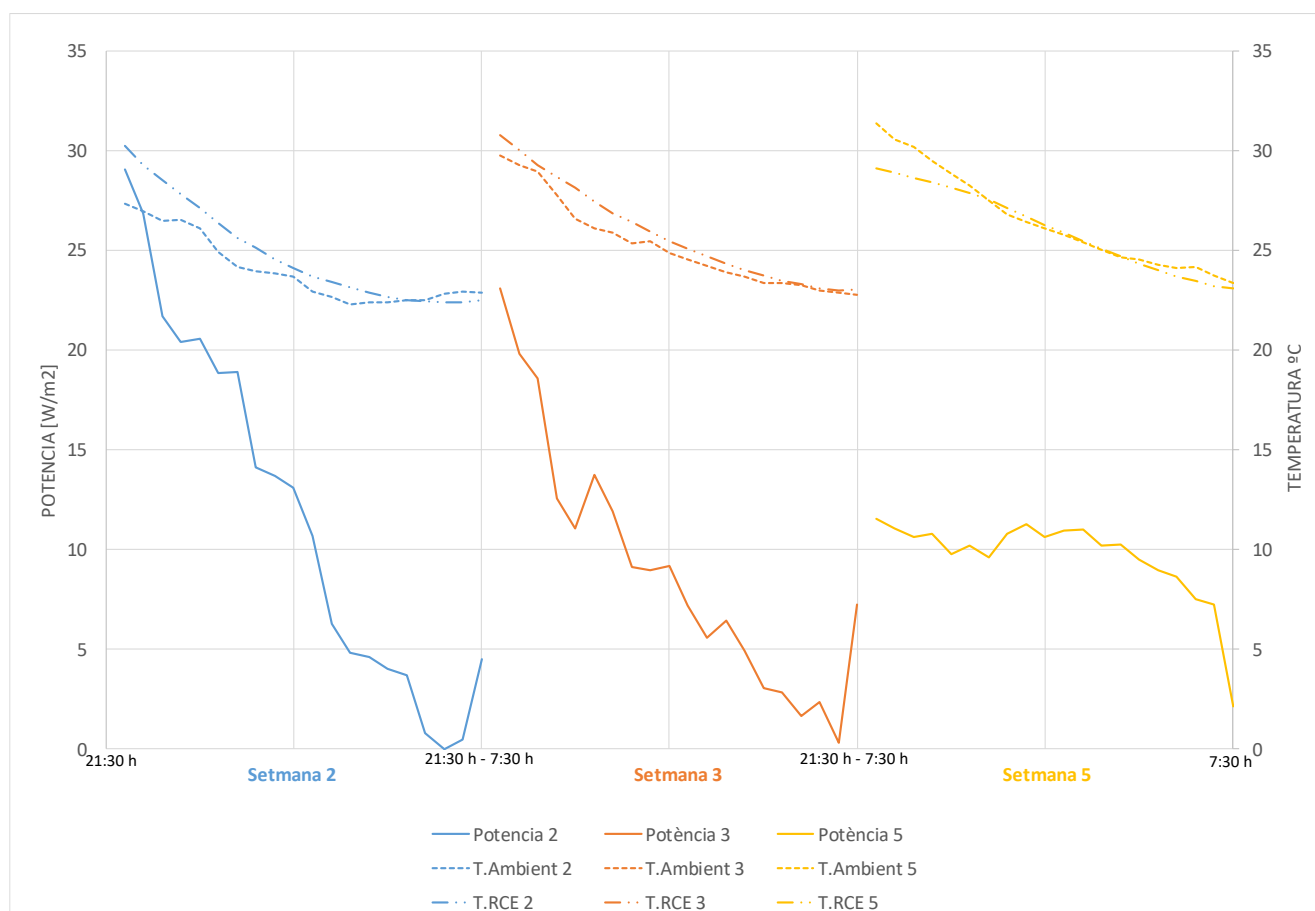
Gràfic 5: Potències frigorífiques i temperatures mitjanes nocturnes amb cel clar

Pel que fa a la diferència de temperatures entre la temperatura ambient i la de sortida del RCE es podria afirmar que el prototip RCE aconsegueix reduir la temperatura de l'aigua per sota de la temperatura ambient a partir de mig període de mode nocturn, és a dir, durant les primeres setmanes, aquesta diferència de temperatura és negativa a partir de les 3:30 hores de la matinada i es manté fins al final del període nocturn (en l'annex de resultats experimentals s'hi troben les taules amb la informació més detallada).

Cal destacar que els resultats obtinguts durant part de la setmana 5 i tota la setmana 6, després de la neteja del film de polietilè s'assoleixen unes temperatures a la sortida del RCE d'uns 2 graus per sota de la temperatura ambient amb valors màxims superiors als 3 graus de diferència.

Respecte a les nits ennuvolades, que varen ser la nit del 16 al 17 de juliol (Setmana 2), les nits del 25 al 26 i del 26 al 27 de juliol (Setmana 3) i les nits del 6 al 11 d'agost (Setmana 5), al tenir una major radiació infraroja que la resta de nits, els resultats són inferiors. Els valors mitjos de les potències assolides en nits ennuvolades, com es pot veure en el Gràfic 6 on també s'hi observa la disminució al llarg de les setmanes, assoleixen valors de entre 9 i 11 W/m² i valors màxims de 29 i 23 W/m² les dos primeres setmanes i inferiors a 12 W/m² la última setmana.

Les temperatures de l'aigua a la sortida del RCE són molt semblants a les de les nits sense núvol. S'assoleixen valors de menys d'un grau per sota de la temperatura ambient les últimes hores de la nit. S'observa també que els millors resultats es troben en l'última setmana que s'assoleix fins a un màxim de 2,2 graus de diferència.



Gràfic 6: Potències frigorífiques i temperatures mitjanes nocturnes amb cel ennuvolat

En l'Annex III s'hi troben representats gràficament les potències, radiacions solar i infraroja, temperatura ambient i a la sortida del RCE i les eficiències de cada dia i nit i separat per setmanes.

Comparació prototips RCE 2017 i RCE 2019

El període d'experimentació de l'any 2017 va durar 7 dies i va ser durant la mateixa època de l'any, juliol i agost, en els quals les temperatures i el clima varen ser molt semblants als de l'experiment dut a terme l'any 2019. Es va separar en dos períodes, el primer període comprèn els dies del 26 al 28 de juliol en els quals la meteorologia va ser de cels clars i assolellats mentre que el segon període, que va del dia 31 de juliol al 3 d'agost, el cel va presentar dies ennuvolats.

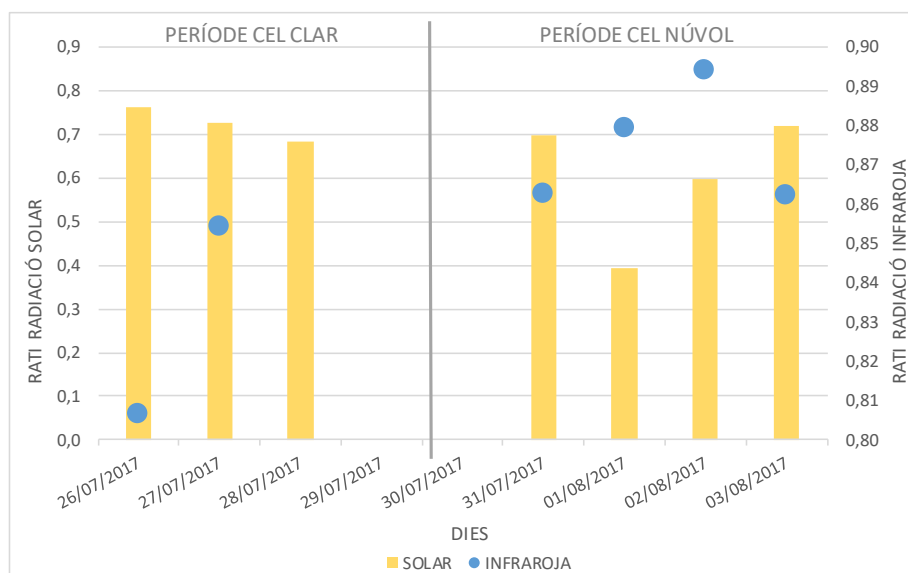
En la Taula 4 s'hi resumeixen els valors mitjans i màxims de les radiacions solar i infraroja dels dos experiments. S'hi pot observar que respecte a la radiació solar els valors són molt semblants, ja que són els típics de l'època i del clima de la ciutat de Lleida.

	Radiació solar [W/m ²]		Rad infraroja [W/m ²]	
	2019	2017	2019	2017
Mitjana	674	670	430	350
Màxim	988	960	490	393

Taula 4: Comparació dels valors de radiació solar i infraroja de l'any 2017 i 2019

Per poder comparar els experiments, es busquen dies i nits de cada tipus (ennuolat o no) amb característiques semblants de cada un dels experiments.

Per a trobar aquests dies s'han calculat les mitjanes de cada mitja hora de l'any 2017, tal i com es va fer amb les dades del 2019, i les mitges dels ratios de radiació solar diàries i radiació infraroja nocturnes. En el Gràfic 7 s'hi representa aquestes mitjanes dels ratios de radiacions.



Gràfic 7: Ratis radiacions solar i infraroja dels dos períodes del 2017

Aplicant el mateix criteri per a classificar l'estat del cel, ennuolat o clar, que s'ha aplicat en l'experiment del 2019 es trien els dies i nits més representatius de cada cas (ennuolat o clar) de l'experimentació del 2017.

Amb els valors d'aquests dies es busquen entre els valors del 2019 els dies i nits més semblants per tenir una comparació justa, ja que el dia més assolellat del 2019 té valors molt per damunt dels del 2017 per exemple.

En les taules següents s'hi mostren els dies i nits escollits per a la comparació de cada experiment.

		Dia	Rati radiació solar
Dies cel clar	2017	27/07/2017	0,726
	2019	Setmana 2	0,728
Dies cel ennuvolat	2017	01/08/2017	0,395
	2019	Setmana 2	0,363

Taula 5: Dies amb ratis semblants de cada any per a la comparació

		Nit	Rati radiació infraroja
Nits cel clar	2017	26 al 27 juliol	0,807
	2019	Setmana 5	0,778
Nits cel ennuvolat	2017	1 als 2 i del 2 al 3 d'agost	0,890
	2019	6 d'agost	0,810

Taula 6: Nits amb ratis semblants de cada any per a la comparació

Cal dir que, la nit amb el cel clar del 2017, s'ha triat aquella amb la radiació infraroja més baixa ja que, tot i això, si apliquem el criteri utilitzat en l'apartat anterior no es consideraria una nit amb cel clar. També cal afegir que les nits amb el cel més ennuvolat del 2019 tenen, generalment, un rati considerablement menor que les nits ennuvolades del 2017.

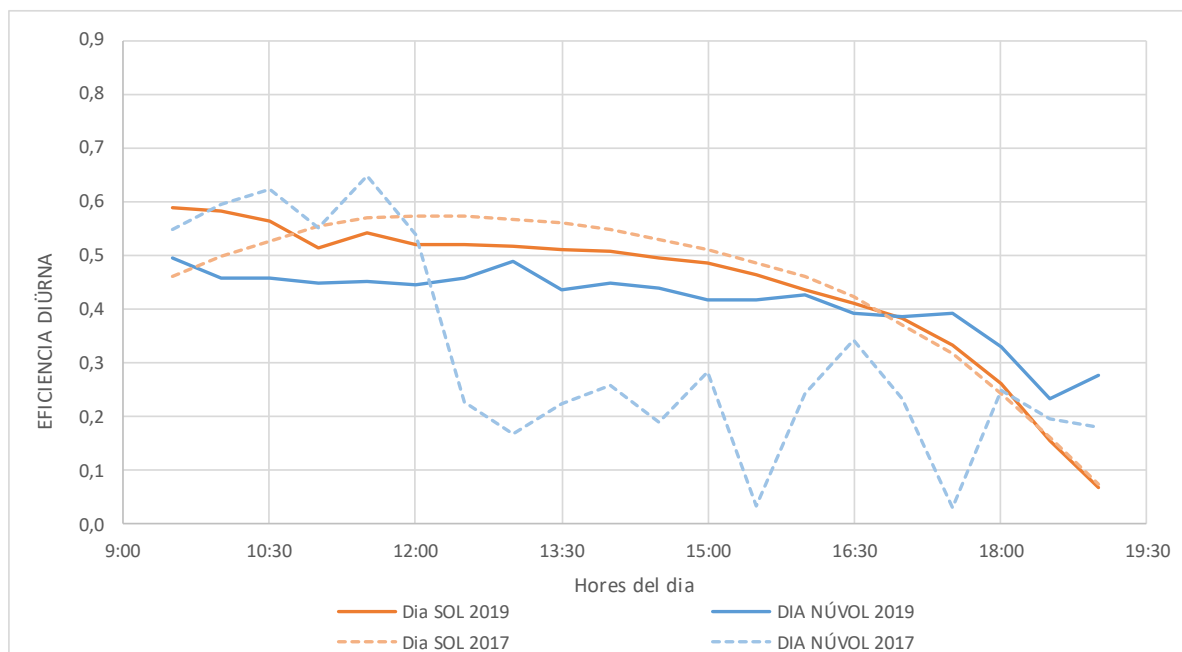
Mode diürn: col·lector solar tèrmic per a producció de calor

En el Gràfic 8 i la Taula 7: Comparació de les eficiències diürnes dels dos prototips Taula 7 s'hi representen les eficiències del mode de funcionament diürn com a col·lector solar.

Es pot veure que els resultats en aquest mode de funcionament són molt similars en els dos prototips. En els dies amb cel clar, el prototip RCE del 2017 va obtenir més bons resultats, però en els dies amb cel ennuvolat, tot i les oscil·lacions típiques d'aquestes condicions, el prototip del 2019 té eficiències més altes.

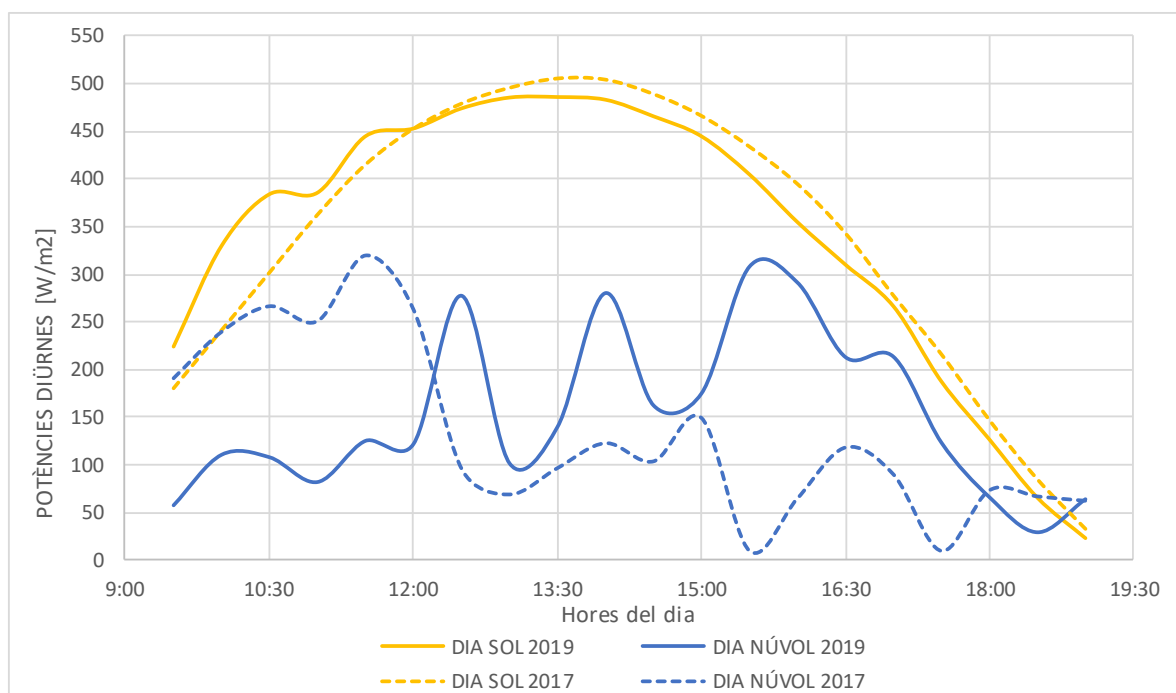
	DIA CEL CLAR		DIA CEL ENNUVOLAT	
	2019	2017	2019	2017
Eficiència mitjana	0,443	0,45	0,415	0,318
Eficiència màxima	0,590	0,57	0,496	0,649

Taula 7: Comparació de les eficiències diürnes dels dos prototips



Gràfic 8: Eficiències diürnes mitjanes de dies assolellats i ennuvolats del 2017 i 2019

En el Gràfic 9, on es veuen reflectides les potències mitjanes diürnes dels dos experiments, es pot veure clarament aquesta semblança en els resultats obtinguts en els dos prototips RCE. Assolint unes potències mitjanes d'uns 340 W/m^2 i amb màxims d'entre 485 i 505 W/m^2 ens els dies assolellats i mitjanes de 130 W/m^2 el 2017 i 150 W/m^2 el 2019 i màxims per damunt de 300 W/m^2 en els dies ennuvolats en els dos prototips.



Gràfic 9: Potències diürnes mitjanes de dies assolellats i ennuvolats del 2017 i 2019

Resumint en la Taula 8 aquests resultats a través de la diferència entre la temperatura assolida per l'RCE i la temperatura ambient en °C, també s'observa aquesta semblança.

	Dia assolellat		Dia ennuvolat	
	2019	2017	2019	2017
Promig	16,93	20,12	5,864	8,88
Màxim	22,53	25,54	9,57	11,03

Taula 8: Comparació de la diferència de temperatura a la sortida del RCE i la temperatura ambient

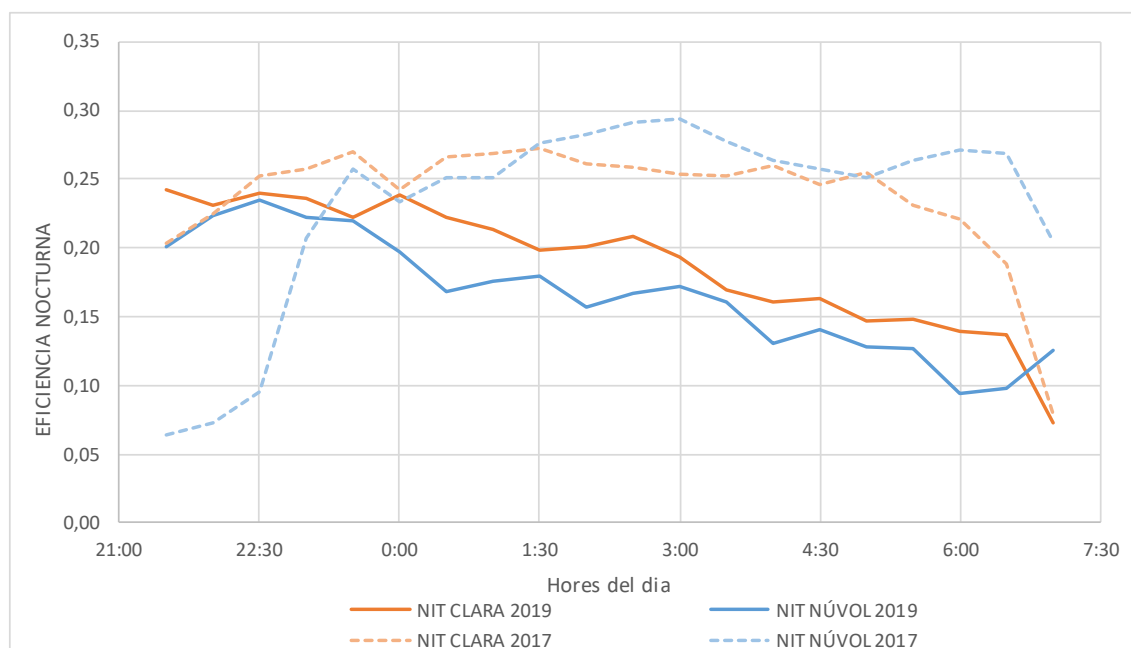
Mode nocturn: refrigerador radiant per a producció de fred

Pel que fa al mode de funcionament nocturn com a refrigerador radiant, les eficiències assolixen valors menors que en el mode de col·lecció solar. Mentre que els valors mitjos en el mode diürn acostumen a estar per damunt de 0,4 amb màxims per damunt de 0,6 en els dos prototips, en el mode nocturn els valors mitjans estan per sota de 0,25 i els màxims no arriben a 0,3.

Es pot apreciar també, en el Gràfic 10 i la Taula 9, que els resultats del prototip RCE 2017 són clarament millors que els del 2019. Els valors mitjans, tant dels dies amb cel clar com ennuvolats, les eficiències són entre un 30 i un 40% majors en el prototip del 2017.

	NIT CEL CLAR		NIT CEL ENNUVOLAT	
	2019	2017	2019	2017
Eficiència mitjana	0,189	0,238	0,166	0,232
Eficiència màxima	0,242	0,273	0,234	0,294

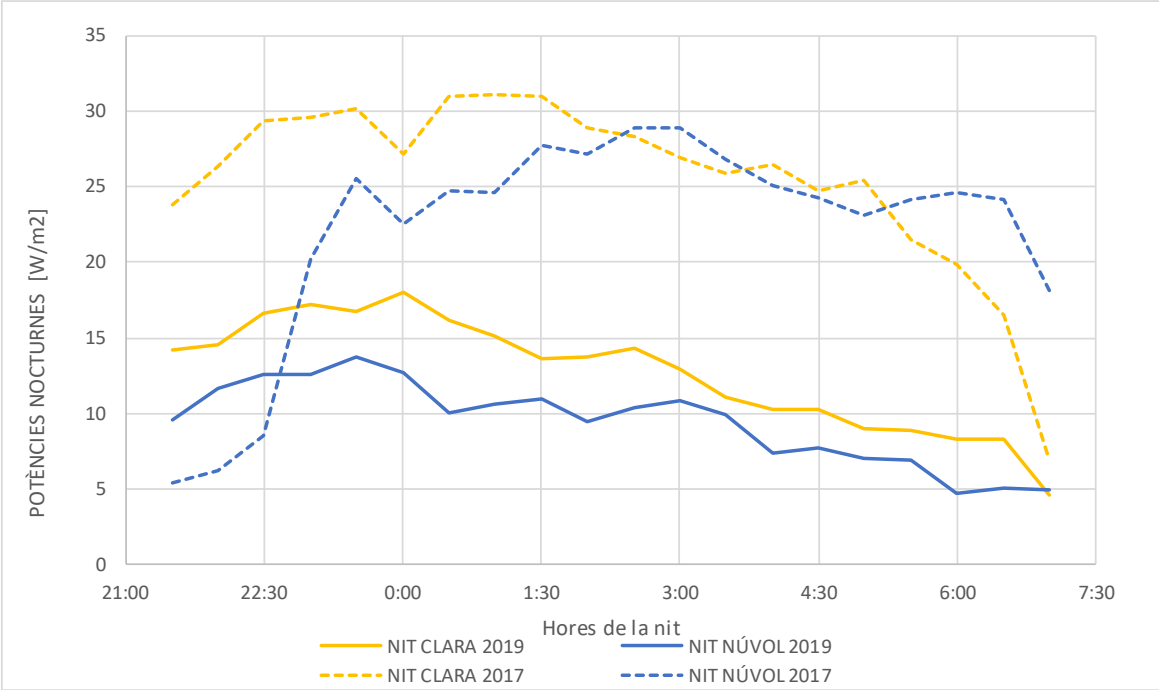
Taula 9: Comparació de les eficiències nocturnes dels dos prototips



Gràfic 10: Eficiències nocturnes mitjanes de nits amb cel clar i ennuvolat del 2017 i 2019

En el Gràfic 11 on es comparen les potències nocturnes mitjanes, es pot veure clarament que la producció de fred en les nits el 2017 és molt superior que les del 2019.

Mentre que les potències mitjanes i màximes del 2019 no arriben a 20 W/m² les mitjanes del 2017 es mouen al voltant dels 25 W/m² i valors màxims al voltant de 30 W/m².



Gràfic 11: Potències nocturnes mitjanes de nits amb cel clar i ennuvolat del 2017 i 2019

	Dia assolellat		Dia ennuvolat	
	2019	2017	2019	2017
Promig	- 0,437	-2,02	-0,72	-2,41
Màxim	-2,98	-3,93	-3,45	-4,54

Taula 10: Comparació de la diferència de temperatura a la sortida del RCE i la temperatura ambient

És important mencionar que, els valors de la radiació infraroja provinent del cel durant tot el període d'experimentació del RCE 2017 són molt menors que els de l'experiment del 2019 com es pot veure resumit en la Taula 11.

	Nits clares		Nits ennuvolades	
	2019	2017	2019	2017
Promig	370	331	390	354
Màxim	417	341	418	368
Mínim	343	325	378	343

Taula 11: Valors de la radiació infraroja provinent del cel durant les nits dels dos períodes d'experimentació.

Aquest fet, que provoca un valor absolut de radiació neta al cel més gran, explicaria els millors resultats de potències nocturnes obtinguts en l'experiment del 2017.

7. Conclusions

Un cop finalitzat l'anàlisi dels resultats experimentals del prototip RCE 2019 i la seva comparació amb l'RCE 2017 se'n poden extreure diverses conclusions.

Pel que fa al mode de funcionament diürn com a col·lector solar, el concepte d'unir els dos modes de funcionament en un únic prototip no redueix la seva eficiència, obtenint uns resultats molt semblants en els 2 prototips de 340 W/m^2 de mitjana en els dies amb cel clar i de 200 W/m^2 en els dies ennuvolats i, per tant, produint aigua calenta per a l'ús domèstic.

Respecte al mode de funcionament nocturn, els resultats han estat millors en el prototip del 2017, assolint potències per damunt dels 25 W/m^2 , que podrien estar justificats per l'augment de la radiació infraroja mitjana provinent del cel que hi ha en l'experiment del 2019 respecte al 2017.

Tot i que els resultats han estat de valors inferiors en el prototip RCE 2019, s'ha demostrat el potencial del concepte per refredar l'aigua per sota la temperatura ambient. S'ha de tenir en compte però, la disminució de les potències assolides amb el pas del temps. Com ja s'ha esmentat anteriorment, aquesta tendència podria estar justificada per el deteriorament de la coberta de polietilè i que, en el prototip RCE 2019, s'agreuja degut a estar sota la coberta de vidre diürna.

Val a dir que el període experimental del prototip RCE 2017 va ser curt, en comparació al del 2019, per a poder efectuar una comparança justa entre els dos prototips doncs no és pot comprovar si el deteriorament de la coberta de polietilè és el mateix en el dos prototips o si en el del 2017 triga més en deteriorar-se al estar protegida durant el dia.

També s'ha pogut comprovar l'efecte negatiu que té l'acumulació de pols i brutícia en la coberta en el mode de refrigerador radiant veient doncs que, en la setmana 6, després de netejar la coberta, s'ha produït més fred que la resta de setmanes tot i el seu deteriorament.

Son necessàries doncs, les millores en el mode de refrigerador radiant per assolir temperatures més baixes que puguin ser utilitzades de manera activa en els edificis i l'ús domèstic. Sobretot pel que fa al tipus de material utilitzat en la coberta. Un material més resistent a les condicions climàtiques i a la calor podria resistir millor al deteriorament i mantenir uns bons resultats amb el pas del temps. També tindria l'avantatge de poder ser més fàcil de netejar i així poder fer-ne un manteniment constant sense risc de malmetre'n les característiques.

Bibliografía

- [1] X. Lu, P. Xu, H. Wang, T. Yang, y J. Hou, «Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1079-1097, nov. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.058.
- [2] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, y G. Pei, «Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 155, pp. 660-666, jun. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.028.
- [3] X. Sun, Y. Sun, Z. Zhou, M. A. Alam, y P. Bermel, «Radiative sky cooling: fundamental physics, materials, structures, and applications», *Nanophotonics*, vol. 6, n.º 5, pp. 997-1015, ago. 2017, doi: 10.1515/nanoph-2017-0020.
- [4] B. Zhao *et al.*, «Performance analysis of a hybrid system combining photovoltaic and nighttime radiative cooling», *Appl. Energy*, vol. 252, p. 113432, oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113432.
- [5] S. Vall y A. Castell, «Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 803-820, sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.010.
- [6] S. Vall, A. Castell, y M. Medrano, «Energy Savings Potential of a Novel Radiative Cooling and Solar Thermal Collection Concept in Buildings for Various World Climates», *Energy Technol.*, vol. 6, n.º 11, pp. 2200-2209, nov. 2018, doi: 10.1002/ente.201800164.
- [7] S. Vall, M. Medrano, C. Solé, y A. Castell, «Combined Radiative Cooling and Solar Thermal Collection: Experimental Proof of Concept», *Energies*, vol. 13, n.º 4, p. 893, feb. 2020, doi: 10.3390/en13040893.
- [8] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, N. Chen, y G. Pei, «Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects», *Appl. Energy*, vol. 236, pp. 489-513, feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.018.
- [9] «Solar Radiation Measurement - Kipp & Zonen». [En línea]. Disponible en: <https://www.kippzonen.com/>. [Accedido: 09-mar-2020].
- [10] Jerónimo Lorente y Consejo General de Colegios Oficiales de Farmacéuticos, «La radiación solar - Curso de fotoprotección». .
- [11] STEP, S.L., «Sistema Adquisición de datos - STEP, S.L.» [En línea]. Disponible en: <http://stepsl.com/index.php?> [Accedido: 09-mar-2020].
- [12] «Manual Primo Advanced Cabalímetro». [En línea]. Disponible en: https://www.badgermeter.de/fileadmin/content/badgermeter/media/seiten/Service/Prospekte/Abgekuendigte_Produkte/MID/MID_PA_BA_02_0203.pdf. [Accedido: 09-mar-2020].
- [13] «Manual Cabalímetro EGE». [En línea]. Disponible en: https://ege-elektronik.com/PDF/Datenblatt/E1_47.pdf. [Accedido: 09-mar-2020].
- [14] «Panel solar - BAXI». [En línea]. Disponible en: <https://www.baxi.es/-/media/inriver/7973-655.pdf>. [Accedido: 09-mar-2020].
- [15] «Pirgeometre - manual». [En línea]. Disponible en: http://www.deltaohm.com/ver2012/download/LP_Pirg_01_M_es.pdf. [Accedido: 09-mar-2020].
- [16] «Catalogo sondas completo - REMBERG». [En línea]. Disponible en: http://www.remberg.es/PDF_archivos/0-Sondas/00-catalogo%20sondas%20completo.pdf. [Accedido: 09-mar-2020].

Annex I: Fitxes tècniques

- Sistema d'adquisició de dades [11]
- Cabalímetre mode diürn [12]



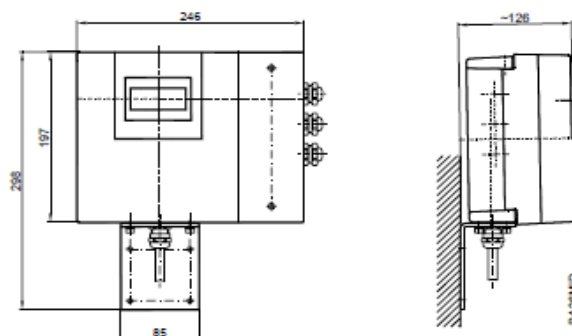
Badger Meter Europa GmbH

Primo® Advanced

8.4 Amplifier type Primo® Advanced

Technical data	
Type	Primo® Advanced
Power	85 – 265 VAC, 45 – 65 Hz Optional 24 VDC (-10% ... +20%), 900 mA
Analog output	0/4 – 20 mA, $\leq 800 \Omega$ Flow direction is displayed via separated status output.
Pulse output	Active 24 V, 25 mA Passive 30 V, 250 mA (open collector) max. 10kHz
Status output	1 min./max. alarm or preselection meter 1 flow direction 1 error message
Medium control	Separate electrode
Programming	3 keys, RS 232, HART
Interface	RS 232 for measuring values and programming, optional: HART
Flow range	0,03 up to 10 m/s
Accuracy	$\geq 0,5$ m/s better $\pm 0,25\%$ of actual flow $< 0,5$ m/s $\pm 1,25$ mm/s of actual flow
Repeatability	0,1%
Flow direction	Bi-directional
Pulse length	Programmable up to 500 ms
Outputs	Short circuit safe and galvanically isolated
Low flow cut off	0 – 10%
Display	LCD, 4 lines/16 characters, backlight actual flow, 2 totalizers, status display
Housing	Powder coated aluminium die cast
Protection class	IP 65
Cable insertion	Power and signal cable (outputs) 3 x M20
Signal cable	From detector M20
Ambient temperature	-20 up to + 60°C

Dimensions
Primo® Advanced



MID_PrimoAdvanced_Bedienungsanleitung_0704_e.doc

- Cabalímetre mode nocturn [13]

Flow Sensors



Inline-Compact

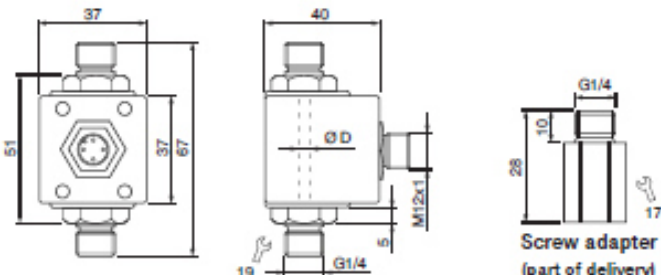





Series SDNC 503

DC 24 V

Flow monitoring of
50 up to 2000 ml/min

Can be easily integrated in the tubing
Immediately ready for use - no adjustment

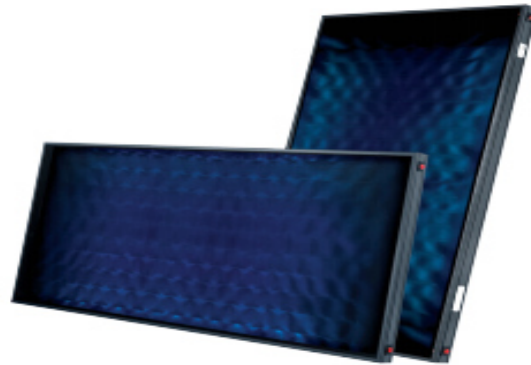


Design	G1/4 • Ø3.6 mm				
Dimensions					
Detection range	[l/min]	water 0.05...1.0	water 0.2...2.0	water 0.05...1.0	water 0.2...2.0
Inner diameter D	[mm]	3.6	3.6	3.6	3.6
Output		 4...20 mA, linear P11342	 4...20 mA, linear P11343	 pulse, linear P11344	 pulse, linear P11345
ID-No.		P11342	P11343	P11344	P11345
Type		SDNC 503 GA-10	SDNC 503 GA-20	SDNC 503 GP-10	SDNC 503 GP-20
Supply voltage	[V]	24 DC ±10%			
Current consumption	[mA]	≤ 70			
Load R _L	[Ω]	200...500	200...500	≥ 1000	≥ 1000
Pulse output	[ml/Puls]	-	-	1	1
Ambient temperature	[°C]	0...+60			
Medium temperature	[°C]	0...+60			
Reaction time typ.	[s]	1 (0.5...10)			
Compressive strength	[bar]	10			
Sensor material		AISI 316 Ti			
Housing material		PBT-GF30			
Protection	[EN 60529]	IP 67			
Connection		M12 connector			
					
Accessories		connecting cable type SLG, SLW, page 1.99			

- Col·lector solar tèrmic [14]

Sol 200

Sol 200 H



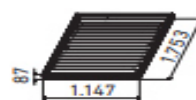
Instal·lació	
Superfície total	m ²
Col·lectors per fila	
Absorbedor	
Espesor absorbedor	mm
Absorbància	%
Emitància	%
Circuit hidràulic	
Vidrio solar	
Aislamiento posterior	
Carcasa	
Garantía (*)	años

Vertical
2
Hasta 10
De aluminio, con tratamiento altamente selectivo
0,4
95
5
Serpentín
Texturizado 3,2 mm.
Fibra de vidrio con velo negro de 40 mm
De aluminio en color gris RAL7016
10

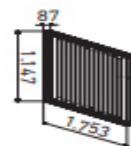
Horizontal
2
Hasta 10
De aluminio, con tratamiento altamente selectivo
0,4
95
5
Serpentín
Texturizado 3,2 mm.
Fibra de vidrio con velo negro de 40 mm
De aluminio en color gris RAL7016
10

Superficie total	m ²
Superf. de apertura	m ²
Capacidad	l
Peso vacío	kg
Presión máx. trabajo	bar
Temp. estancamiento	°C

2,01
1,90
1,9
34
10
213

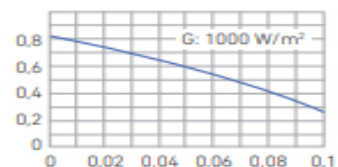
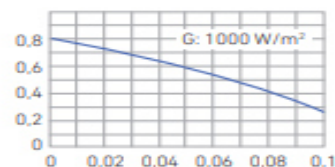


2,01
1,90
2,2
35
10
211



Curva de rendimiento

Rendimiento η
T*

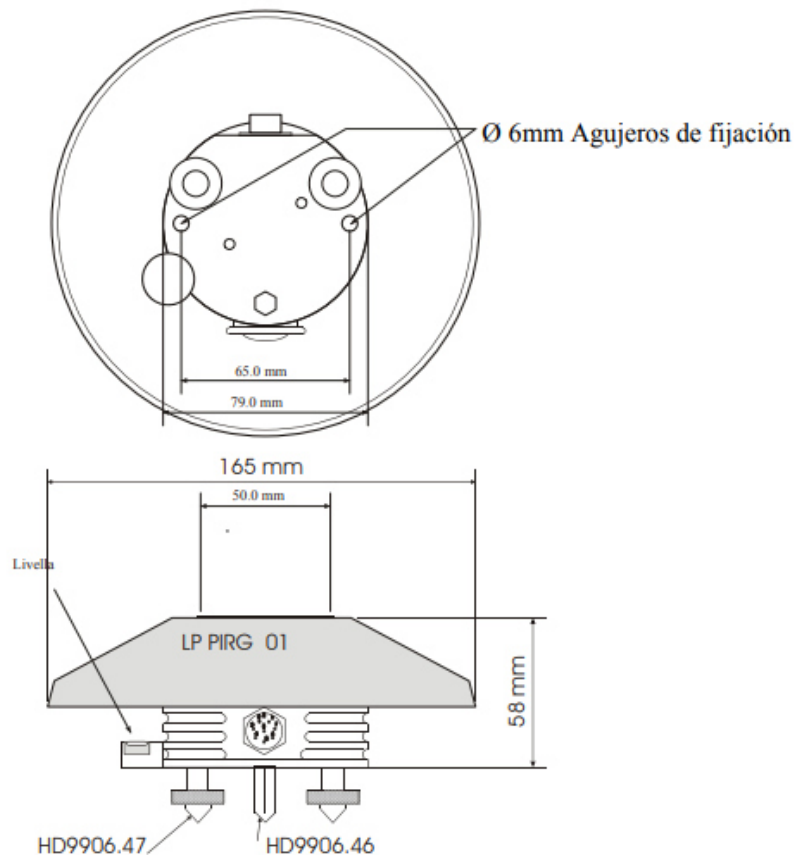


Ecuación característica
Contraseña certificación
Referencia
PVP

$\eta = 0,817 - 3,716 T^* - 0,018 GT^{*2}$
GPS-8417
720364001
566 €

$\eta = 0,809 - 3,989 T^* - 0,017 GT^{*2}$
GPS-8420
720364301
586 €

- Pirgeòmetre [15]



Característiques tècniques

Sensibilitat típica	5 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Impedància	33 $\Omega \div 45 \Omega$
Rang de mesura	300;+300 W/m^2
Rang de visió	160°
Rang espectral (Transmissió de la finestra de silici)	5.5 $\mu\text{m} \div 45 \mu\text{m}$ (50%)
Temperatura de treball	-40 °C \div 80 °C
Pes	0.90 Kg

Característiques tècniques segons ISO 9060

Temps de resposta (95%)	<28 seg
Off-set de zero (Tipo B): Resposta a la variació de la temperatura ambient de 5K/h	< $ \pm 4 \text{ W}/\text{m}^2$
Inestabilitat a termini (1 any)	< $ \pm 1.5 \%$
No linealitat	< $ \pm 1 \%$
Selectivitat espectral	< $ \pm 5 \%$
Resposta segons la temperatura	< 3 %
Resposta segons el Tilt	< $ \pm 2 \%$

- Sensor de temperatura [16]

SONDA DE TEMPERATURA PT100

RACOR DESLIZANTE Y
SALIDA DIRECTA CABLE

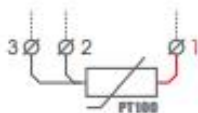
modelo

Pt-80x6R1/2D-2M

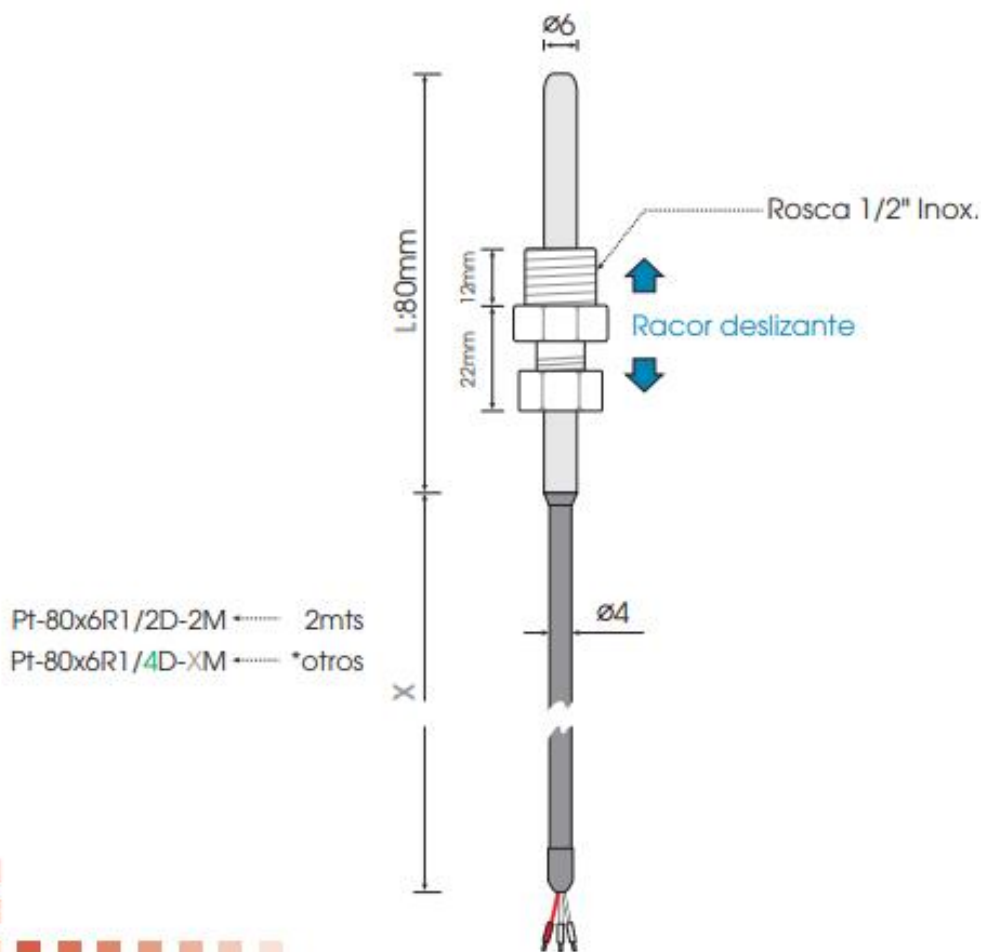
Pt-Lx6R1/4D-XM

L Longitud de la Vaina
X Longitud del Cable

CARACTERÍSTICAS



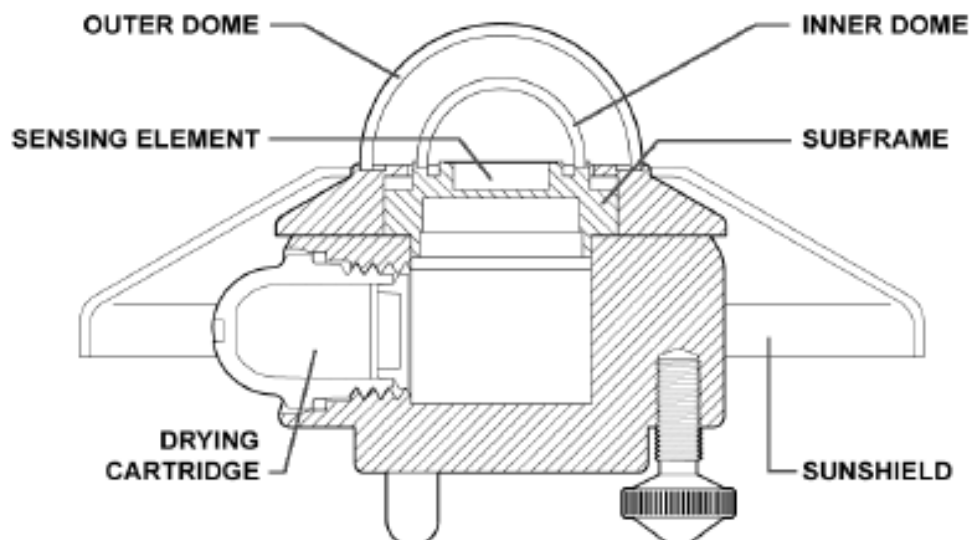
- Máxima temperatura de trabajo de la vaina: -50°C / +250°C * otras temperaturas (consultar)
Máxima temperatura de trabajo del cable silicona: -50°C / +120°C
- Sensor interno de temperatura: clase DIN B
- Racor deslizable de 1/2" GAS. * otros 1/4" GAS...
- Sonda longitud útil: 80mm x 6mm diámetro. Acero inoxidable AISI-316L
- Cable de Silicona: 3 hilos d:4mm X Longitud de Cable: 2mts, 3mts, 10mts
* opcional: cable malla.



- Solarímetre [9]



Specification	Unit	CMP 6/ CMA 6	Definition
Spectral range	nm	285 - 2800	50 % response point
Sensitivity	$\mu\text{V/W/m}^2$	5 to 20	Signal output for 1 W/m^2 irradiance
Impedance	Ω	20 to 200	At instrument housing connector
Response time	s	< 18	95% of final value
		< 6	63 % of final value
Non-linearity	%	< 1	From 0 to 1000 W/m^2 irradiance
Temperature dependence of sensitivity	%	< 4	Variation in range - 10 °C to + 40 °C from value at + 20 °C *(- 20 °C to + 50 °C)
Tilt error	%	< 1	Deviation when facing downwards
Zero offset A	W/m^2	< 15	At 0 to - 200 W/m^2 of IR net radiation
Zero offset B	W/m^2	< 4	At 5 K/h temperature change rate
Operating temperature	°C	-40 to +80	Storage temperature is the same
Field of view		180°	Hemispherical
Directional error	W/m^2	< 20	At 80° with 1000 W/m^2 irradiance
Maximum irradiance	W/m^2	2000	Level above which damage may occur
Non-stability	%	< 1	Variation in sensitivity per year
Humidity	% RH	0 - 100	Relative Humidity
Uncertainty in daily total	%	< 5	95 % confidence level



Annex II: Detalls experimentació

El diari fet durant l'experimentació, recull les hores en que s'efectuava el canvi de mode tant al matí com de la tarda, el cabal que circulava durant el mode nocturn i el tipus de cel que hi havia hagut durant cada període, ennuvolat o cel clar. També recollia diferents anotacions sobre els canvis que es produïen o detalls importants que podien afectar el funcionament normal de la instal·lació experimental.

A continuació s'adjunta una taula resum d'aquestes dades i les anotacions del diari.

Diari

11/07/19

We configured the installation in day mode. We cleaned the glass because it was very dirty due to the assembly process. The installation has been start and data has begun to collect at 10:00.

However, it has been observed that there is still a problem with a temperature sensor; more concretely is the sensor that measures the temperature of the water from the hot tank.

It has also been observed that during the change of mode the collector's rubber does not slip very well and it is detaching: We need to look for a solution that could replace the rubber or glue it with another paste.

In order to facilitate the change of operation, a guide on how the valves must be in each mode has been made and has been placed in the electrical panel of the installation.

Finally, the register has been stopped approximately from 13:50 to 14:22 in order to fix the Hot tank temperature sensor that did not work.

The change to the night mode has made at 20:30. The valve has been adjusted to regulate the flow rate of the cooling system to obtain an approximate value of 1.6 L/min.

12/07/19

It has been observed that during the night the flow has been decreasing since it was left at a value of 1.6 L / min and that morning was at 0.9 L / min. We also have been observed a pressure lost.

We noticed some leaking valves and they were fixed. The first data were also extracted. It must be monitored so that the file that is created contains all the necessary data, but these are not corresponding to the correct Tag.

Indeed, we can see on the following pictures that column B named Tag3 is useless, the sensor is not working: it is the sensor of the second outlet of the previous installation from 2017. The column C has no name, but it is the sensor of the hot tank that has not yet repaired. The column D correspond of the day flowrate, named flow Col, the column E is the night flowrate named flow RC, the column F correspond to the temperature in the input of the collector, the column G the temperature of the hot tank and finally the column H is the temperature of the outlet of the RC.

To resume, the first column of data can be delete. Then the 3 first Tag name need to be move from one square on the left. Then you can add the miss tags RC IN TEM. Finally, you swap the last two tags.

A	B	C	D	E	F	G	H
	Tag 3 [COL_IN_TEM]		Tag 9 [COL_TNK_TE]	Tag 5 [FLOW_COL]	Tag 2 [FLOW_RC]	Tag 1 [RC_OU_TEM]	Tag 8 [RC_TNK_TEM]
11/07/2019 09:13	3276,7	3276,4	4,152	0,223	30,6	35,7	31,8
11/07/2019 09:14	3276,7	3276,4	4,143	0,218	29,5	35,5	29,8
11/07/2019 09:15	3276,7	3276,4	4,151	0,218	29,6	35,4	30,4

Here is the data once the tags have been corrected.

A	B	C	D	E	F	G
data	Tag 9 [COL_TNK_TEM]	Tag 5 [FLOW_COL]	Tag 2 [FLOW_RC]	RC_IN_TEM	Tag 8 [RC_TNK_TEM]	Tag 1 [RC_OU_TEM]
11/07/2019 09:13	3276,4	4,152	0,223	30,6	35,7	31,8
11/07/2019 09:14	3276,4	4,143	0,218	29,5	35,5	29,8
11/07/2019 09:15	3276,4	4,151	0,218	29,6	35,4	30,4

The change of the following night was carried out until 9:00 p.m because there was a problem with the heat exchanger, reason why the pump of the circuit has been stopped. In order to cool the water from the hot tank, we emptied half of the tank, and filled it with cold water.

First Weekend

Because of the problem of leakage at the entrance of the heat exchanger, we had to stop until Sunday.

15/07/19

We fixed all the leakage; the experiment was put into day mode at 11 AM; because of this long stop the data of this day have not been kept in the general table. Then the circuit has stopped again to change the steam trap of the collector's entrance.

Time of the night change: 20:30

It has been observed that at this time there is already cooling, so maybe the time of change could be advanced to obtain better results. One of the exchanger connections keeps losing water drop by drop. And we still noticed a loss of pressure and of flowrate, from 1,520 L/min to 1,210 L/min.

16/07/19

We tried to measure the losses of the water by putting a container underneath the valves but there are no considerable losses of water at the level of the valves, yet the problem of loss pressure continues. Therefore, the cold tank was checked to see if there was air, the tank has been opened and it has been filled to the maximum.

In addition, the gasket that had been detached were changed.

Time of the night change: 20:17 hour of change. The flow valve has been adjusted to 1.457 L / min, but there was some lost during the night and the flow finish at 1,361 L/min.

17/07/19

The experiments run correctly all day; however, it rains during the afternoon. The clouds arrived the night before and stay all day long.

The flow valve has been adjusted to 1,788 L / min, and for the first time the flowrate stayed constant during the night. But we can still observe a lose pressure

18/07/19

We had to dry the glass cover because of the rain; however, the film of polyethylene stayed wet. We let it dry naturally during the night.

19/07/19

The night flow rate was of 1,818 L/min; the flow rate has decreased to 1,754 L/min

22/07/19

We did not heat the water with the collector during the day. We will only do the cooling part of the experiment. However, during the afternoon at 1:00 p.m. the circuit has been opened because the temperature at the exit of the collector was almost at 60°C. But we keep the collector covered.

23/07/19

We did not heat the water during the day; we only did the cooling during the night.

24/07/19

We did not heat the water during the day; we only did the cooling during the night.

We realized that there was a problem with the pyrgeometer; we change the settings around 13:00. When we started looking into it, we find three things that was wrong about it. First, the sensor was not connected correctly to the data logger, the sensor has two cables, and they have been exchange while connected. Then we had to change the information inside the computer, the computer transformed the volt signal into a value between 0 and 1000, but in the manual of the pyrgeometer says that it should be -300 and 300. Finally, we realized that the value that gives the pyrgeometer was the net balance. To have the incoming radiation we had to use a formula given in the manual:

$$\text{Incoming IR} = \text{Net Balance} + 5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Temperature}^4.$$

To have the correct data of the net balance of the past days, we had to modify the data given by the pyrgeometer. For this, we found the mathematical equation coming from the change of scales in the computer program:

$$\text{Real Net balance} = \frac{\text{old data of Pyg}}{1000/600} - 300 \quad (\text{eq. 1})$$

To make the reverse way, the equation is:

$$\text{old data of Pyg} = \frac{\text{Real Net balance}}{600/1000} + 500 \quad (\text{eq. 2})$$

We wanted to verify the equation we decide to take some point; we made different scale of shade on Top of the pyrgeometer; while we took the value with the past computer settings and with the new settings. Here is the table with the results:

Real (values obtained from the pyrgeometer)		Theoric (values obtained with the equations)		e (%)	
Value with scale -300 to 300	Value with scale 0 to 1000	Value obtained with the eq. 2	Value obtained with the eq. 1		
-88	355	353	-87	1.14	0.56
-95.7	340.4	341	-95.76	-0.06	-0.17
-100	333	333	-100.2	-0.20	0
-37.7	434	437	-39.6	-5.04	-0.69
-91	347	348	-91.8	-0.88	-0.28
-70.8	383	382	-70.2	0.85	0.26

While we modify the pyrgeometer setting, we try to modify the Tags too in order to have the correct tags when we export the file. Which almost work: most of the Tags have been corrected but we still need to delete the first column and swap the Inlet and Outlet Tags.

25/07/19

We did not heat the water during the day; we only did the cooling during the night.
The night flowrate valve has been adjusted to 1,267 L/min. The flow rate stayed constant
The night 25/07 to 26/07 was cloudy.

26/07/19

We go back to the normal experiment; we heat the water during the day.
It rained, and was a cloudy day

Third weekend

It has been decided not to open the heat exchanger during the day to heat the water from the cold tank to see if we could cool the water more under ambient temperature. We did that for the all weekend. It was a cloudy weekend: Friday night and Saturday all day was cloudy. It rains a little on Saturday.

29/07/19

The night flow rate has been adjusted to 1,186 L/min
That day again we decide not to heat the water from the cold tank during the day with the heat exchanger. This week some work has started in the court of the campus, a lot of dirt fly around: The glass cover and the polyethylene film get dirty a lot, the glass is easy to clean but not the film so only the glass has been clean.

30/07/19

The heat exchanger was still off during the day.

31/07/19

There were some clouds for an hour the previous night
The exchanger has been reopened to heat water from the cold tank during the day

01/08/19

We turn off the heat exchanger at 12:45, because we decided that a cold tank at 25°C was closer to the use possible of this experiment. There were some little clouds.

02/08/19

We turn off the heat exchanger all day

Fourth weekend

We turn off the heat exchanger all day

06/08/19

In the early morning we noticed lots of cloud, they probably came the night before, and they stayed until 10:00
Today we cover the panel because there is a big power cut for a long time (8:22 to 20:00).
Marc clean the polyethylene film with an electrostatic towel

07/08/19

Today we change the night flow rate to 1.2 aprox. We will do 4 days with this flowrate.

09/08/19

Windy night

11/08/19

Cloudy day; cloudy and windy night

12/08/19

Clear day.

This night we start the experimental part with a flowrate of 0.8L/min. We will use this value on the next 4 days.

If we take into account the results of the experimental part where we do not use the heat exchanger during the day, tonight's results are the best that we have obtained until now. Maybe it could be because the ambient temperature has decreased. The new flowrate value could be important in these good results.

13/08/19

This night we start the experimental part with a flowrate of 0.8L/min.

The results of the night from 13 to 14 are better than the previous night, so tonight's results are the best that we have obtained until now. The ambient temperatures were lower and the outlet water temperatures were below ambient temperature during all the night almost.

14/08/19

This night we start the experimental part with a flowrate of 0.8L/min.

15/08/19

This night we start the experimental part with a flowrate of 0.8L/min

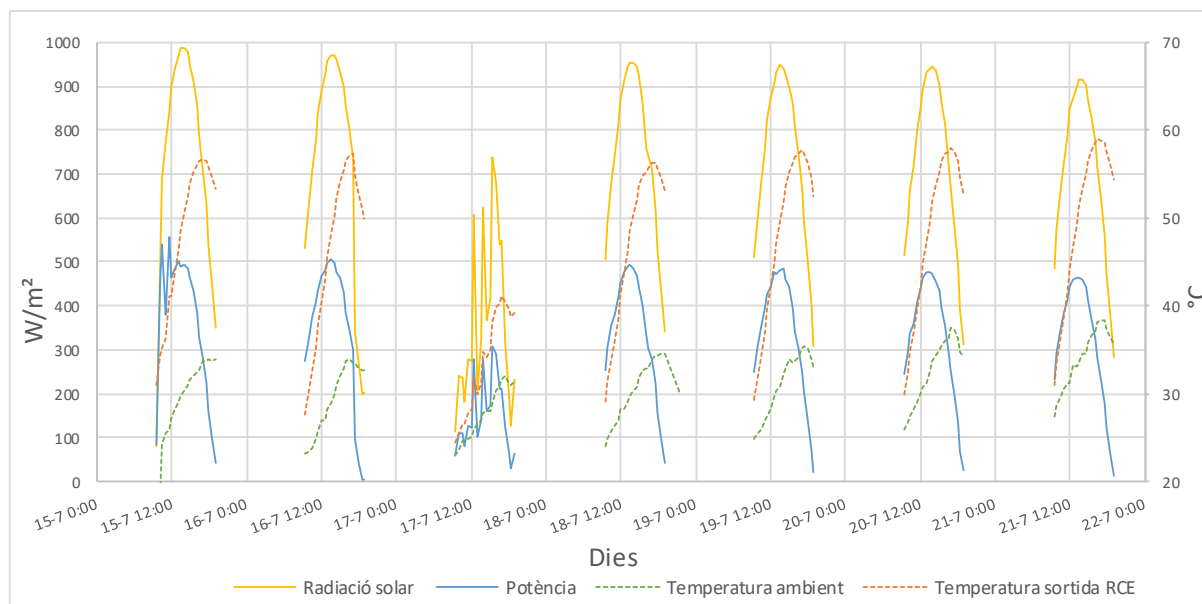
Taula resum

		Time	Flow (L/min)	Weather	Experiment
11/07/2019	Day	/	/	☀	Normal
	Night	20:30	1,6	☀	
12/07/2019	Day	8:45	4,1	☀	Normal
	Night	21:00	1,8	☀	
13/07/2019	Day	/	/	☀	Normal
	Night	/	/	☀	
14/07/2019	Day	09:20	4,2	☀	Normal
	Night	20:37	1,2	☀	
15/07/2019	Day	10:45	4,2	☀	Normal
	Night	20:22	1,5	☀	
16/07/2019	Day	09:22	4,4	☀	Normal
	Night	20:15	1,5	☁	
17/07/2019	Day	08:30	4,1	☁	Normal
	Night	20:28	1,8	☁	
18/07/2019	Day	08:33	4,1	☀	Normal
	Night	20:30	1,8	☀	
19/07/2019	Day	08:30	4,1	☀	Normal
	Night	20:32	1,8	☀	
20/07/2019	Day	08:30	4,1	☀	Normal
	Night	20:35	1,8	☀	
21/07/2019	Day	08:22	4,1	☀	Normal
	Night	20:33	1,7	☀	
22/07/2019	Day	08:34	/	☀	No Heating
	Night	20:08	1,4	☀	
23/07/2019	Day	08:36	/	☀	No Heating
	Night	20:19	1,6	☀	
24/07/2019	Day	08:39	/	☀	No Heating
	Night	19:49	1,6	☀	
25/07/2019	Day	08:44	4,1	☀	No Heating
	Night	20:18	1,3	☁	
26/07/2019	Day	08:43	4,2	☁	Normal
	Night	20:09	1,3	☁	
27/07/2019	Day	08:40	4,1	☁	Heat exchanger off during the day
	Night	20:34	1,4	☀	
28/07/2019	Day	08:42	4,0	☀	Heat exchanger off during the day

29/07/2019	Night	20:14	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	08:33	4,0	☀	
	Night	20:20	1,2	☀	
30/07/2019	Day	08:25	4,1	☀	Heat exchanger off during the day
	Night	20:28	1,0	☀	
31/07/2019	Day	08:27	4,1	☀	Normal
	Night	20:20	1,0	☀	
	Day	08:52	4,1	☀	
01/08/2019	Night	20:15	1,0	☀	Heat exchanger off at 12:45
	Day	08:24	4,1	☀	
02/08/2019	Night	20:08	0,9	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	08:41	4,1	☀	
03/08/2019	Night	20:29	0,9	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	08:40	4,1	☀	
04/08/2019	Night	20:43	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	08:41	4,1	☀	
05/08/2019	Night	20:20	0,9	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	Power cut	Power cut	☀	
06/08/2019	Night	20:15	0,9	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:25	4,3	☀	
07/08/2019	Night	20:04	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:27	4,3	☀	
08/08/2019	Night	20:09	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:19	4,3	☀	
09/08/2019	Night	20:25	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:26	4,3	☀	
10/08/2019	Night	19:53	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:36	4,3	☀	
11/08/2019	Night	20:03	1,3	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:39	4,3	☀	
12/08/2019	Night	20:20	0,8	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:49	4,3	☀	
13/08/2019	Night	20:19	0,8	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:37	4,3	☀	
14/08/2019	Night	19:55	0,8	☀	Heat exchanger off during the day
	Day	8:26	4,3	☀	
15/08/2019	Night	19:57	0,8	☀	Heat exchanger off during the day

Annex III: Resultats experimentals

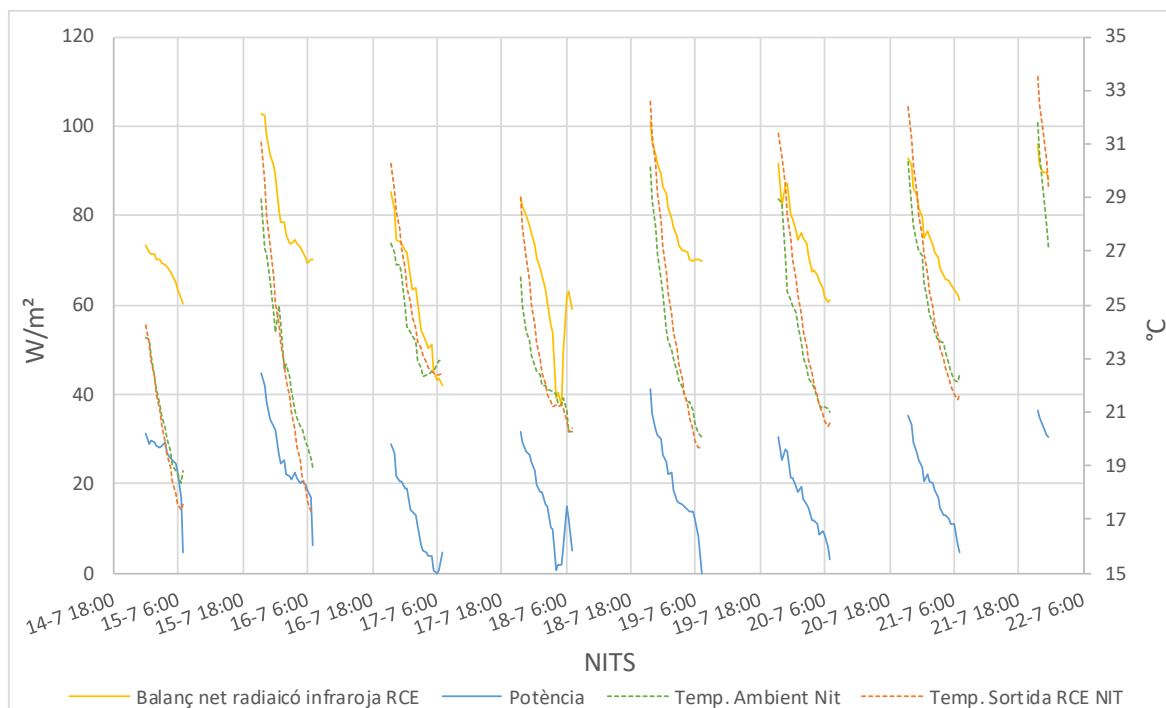
Setmana 2: 15 al 21 de juliol de 2019



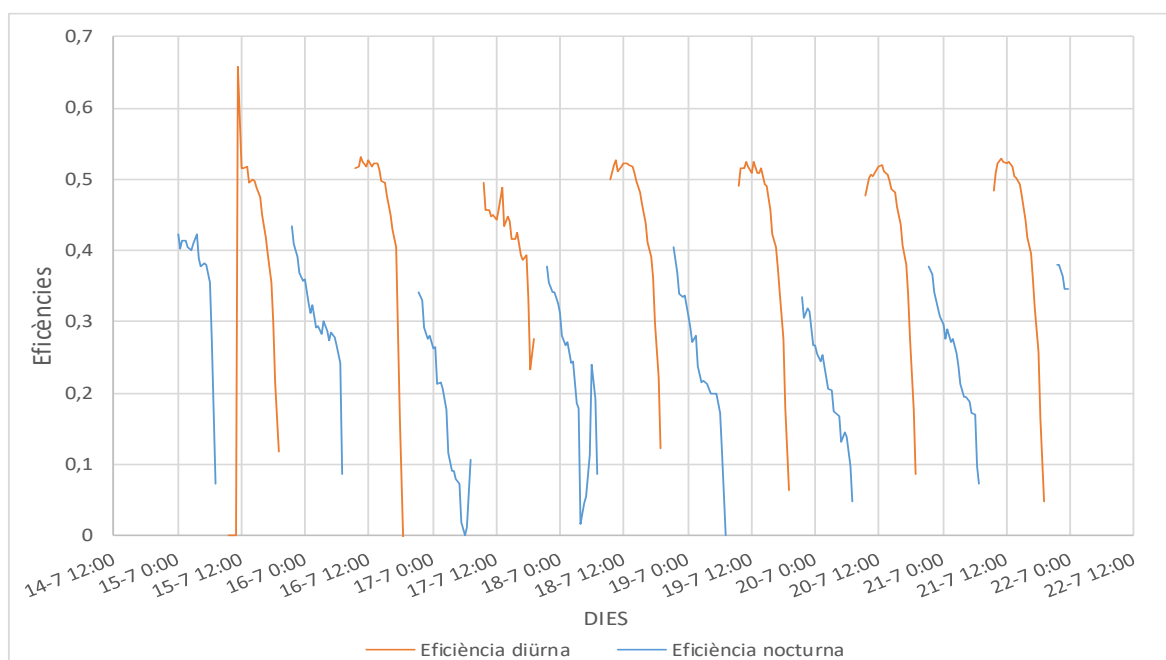
Gràfic 12: Radiació solar, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 2

	Radiació Solar [W/m ²]	Potència diürna [W/m ²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Diürna
Màxim	988,23	554,89	38,32	59,00	0,93
Mínim	80,07	4,05	18,26	24,44	-0,03
Promig	673,94	312,80	30,67	46,03	0,43

Taula 12: Resum de valors de la radiació solar, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 2



Gràfic 13: Radiació infraroja, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 2



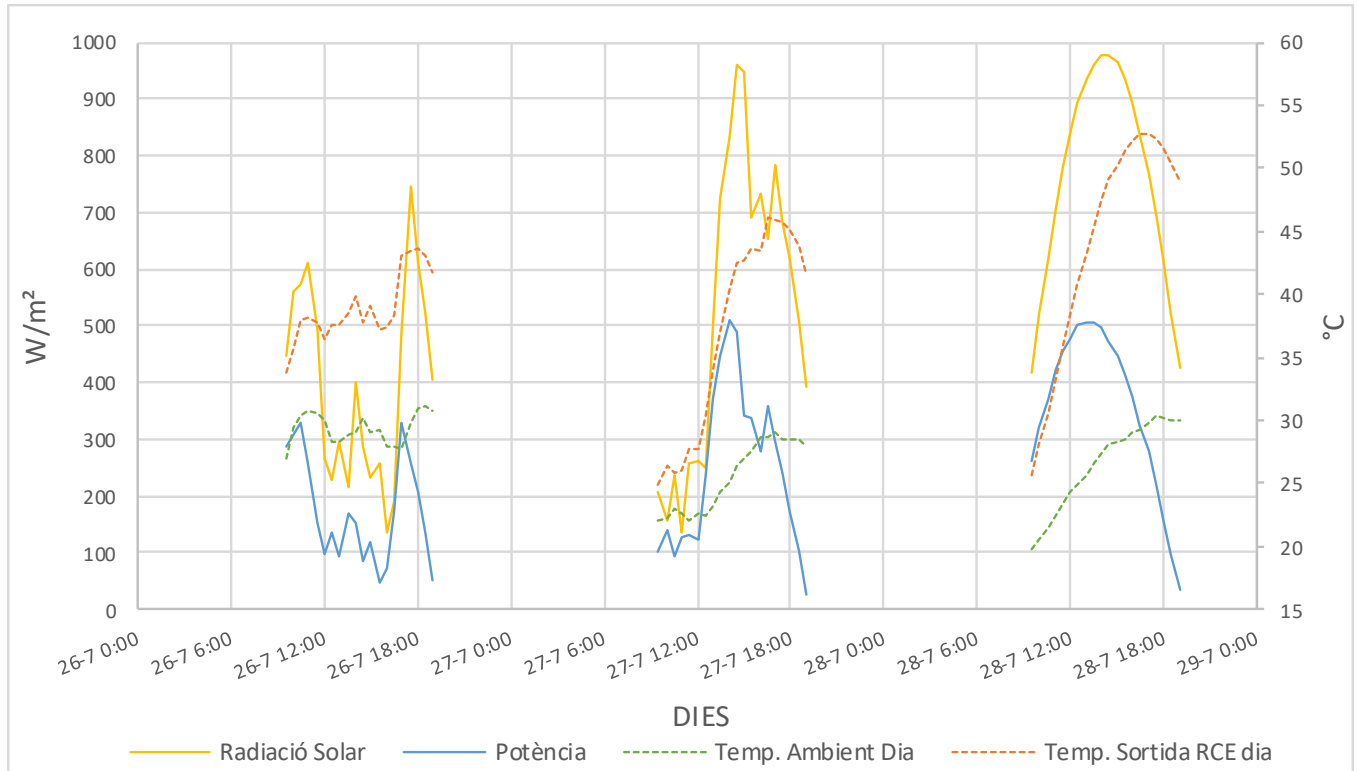
Gràfic 14: Eficiències del dies i nits de la setmana 2

	Radiació infraroja [W/m²]	Balanç net rad. Infraroja RCE [W/m²]	Potència Nocturna [W/m²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Nocturna
Màxim	407,56	102,66	44,55	31,77	33,53	0,43
Mínim	334,21	37,56	0,00	18,38	17,32	0,00
Promig	371,37	72,21	19,37	23,45	23,99	0,25

Taula 13: Resum de valors de la radiació infraroja, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 2

Setmana 3: 22 al 28 de juliol de 2019

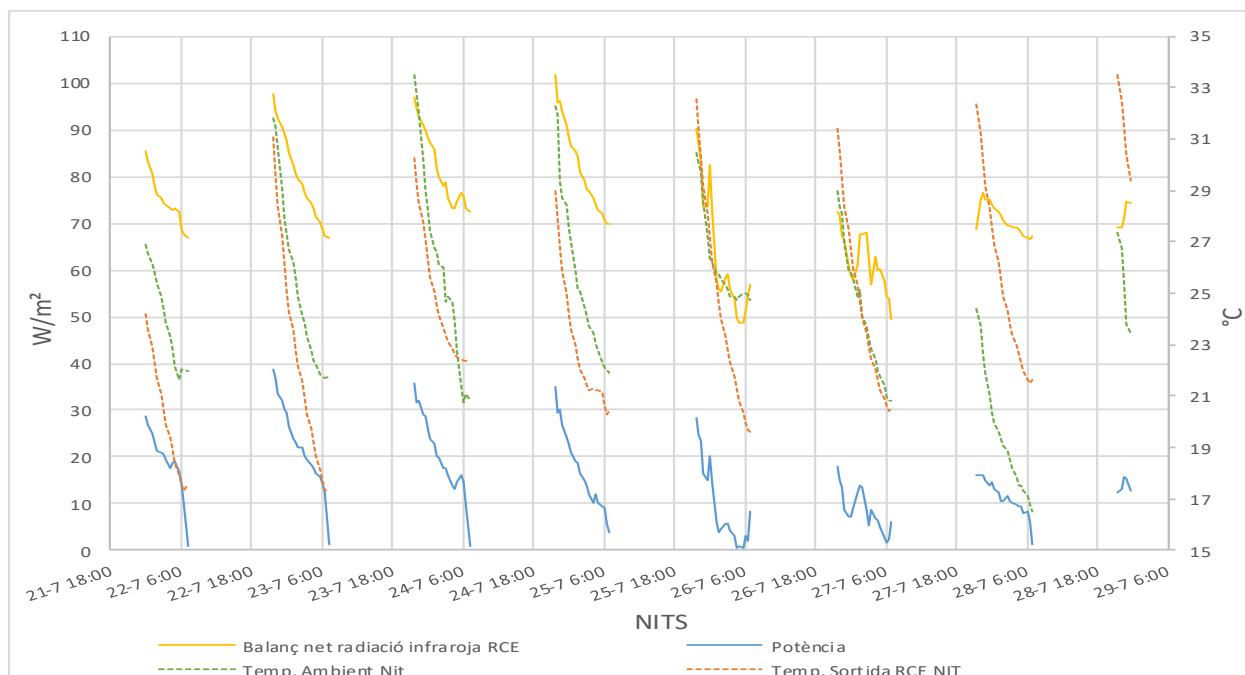
Els dies 22, 23, 24 i 25 no es posar en funcionament el mode diürn de col·lecció solar.



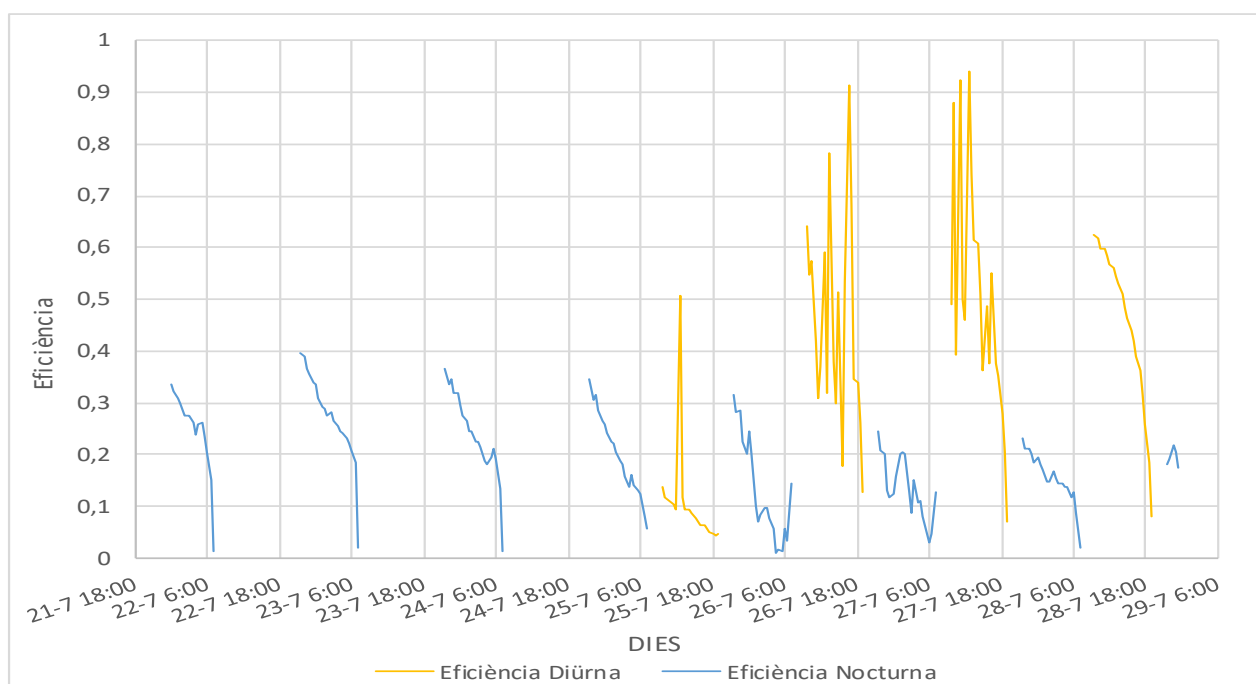
Gràfic 15: Radiació solar, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 3

	Radiació Solar [W/m ²]	Potència diürna [W/m ²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Diürna
Màxim	977,60	508,68	38,56	52,75	0,94
Mínim	135,40	13,38	19,78	24,85	0,04
Promig	602,50	208,91	28,92	38,42	0,38

Taula 14: Resum de valors de la radiació solar, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 3



Gràfic 16: Radiació infraroja, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 3

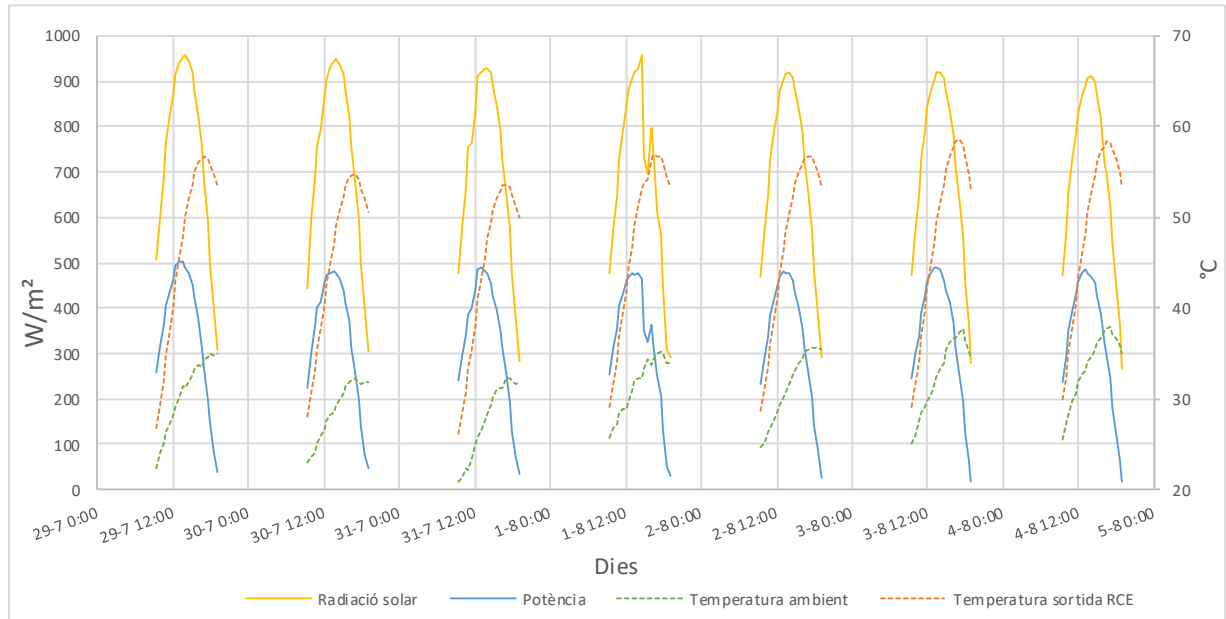


Gràfic 17: Eficiències dels dies i nits de la setmana 3

	Radiació infraroja [W/m²]	Balanç net rad. Infraroja RCE [W/m²]	Potència Nocturna [W/m²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Nocturna
Màxim	414,53	101,85	508,68	33,51	33,53	0,40
Mínim	324,92	48,63	19,78	16,54	17,32	0,01
Promig	374,56	73,48	28,92	24,48	23,99	0,20

Taula 15: Resum de valors de la radiació infraroja, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 3

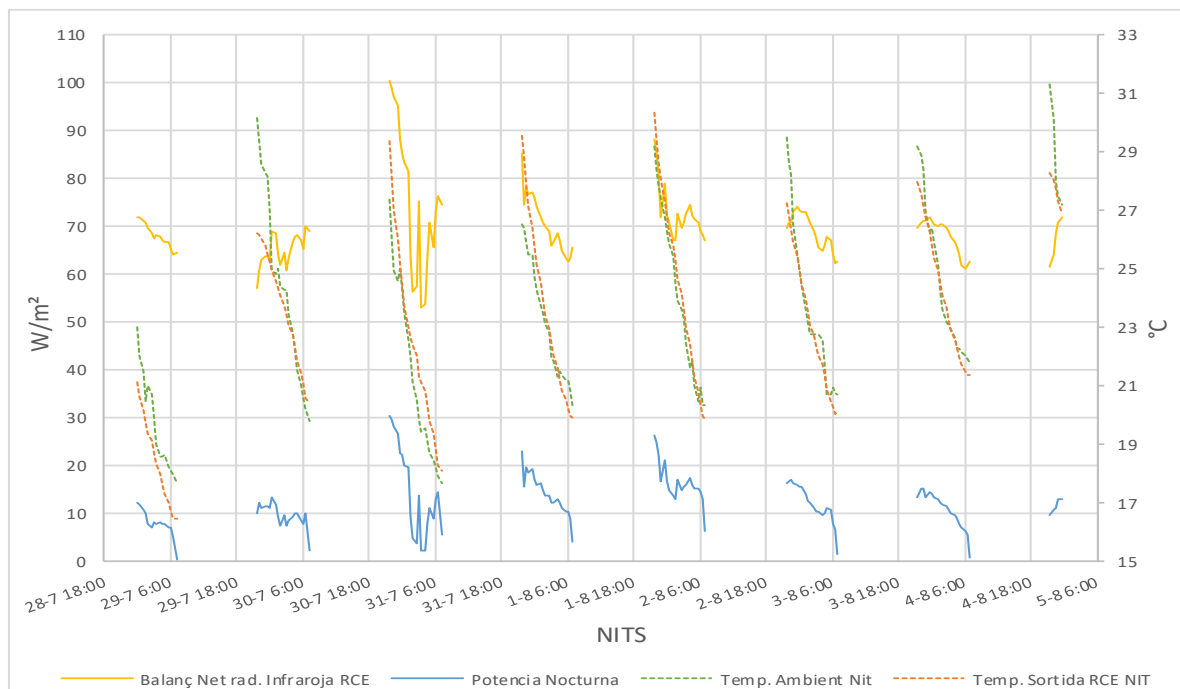
Setmana 4: 29 de juliol al 4 d'agost de 2019



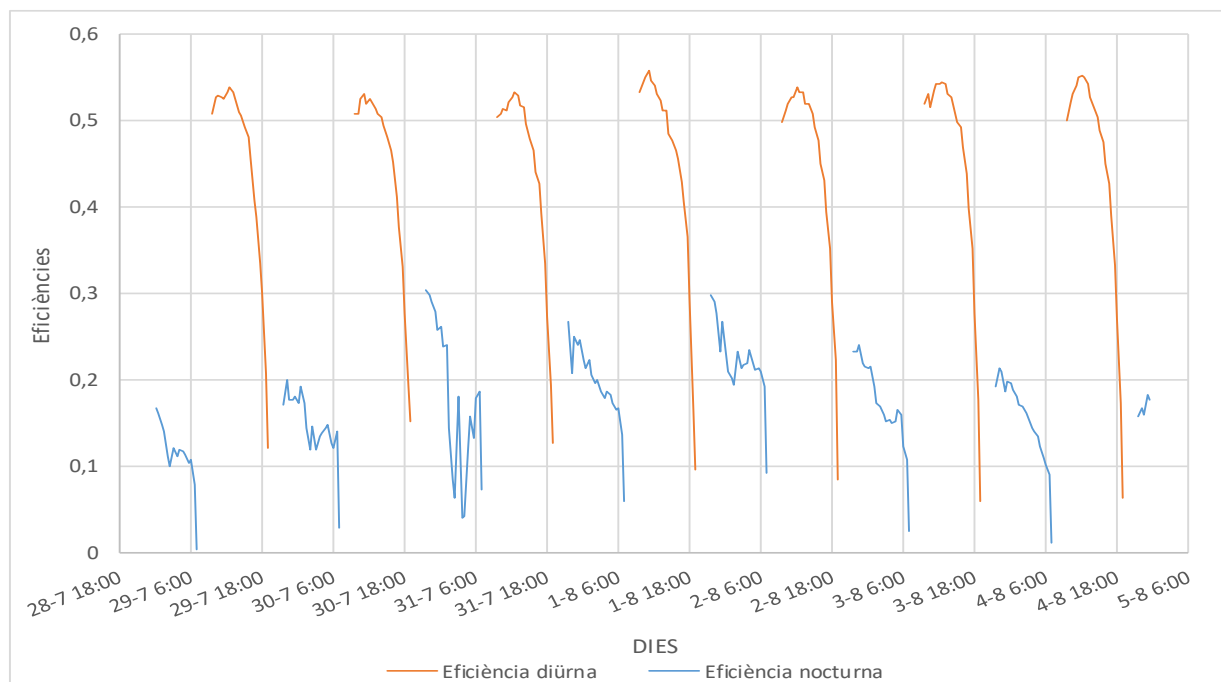
Gràfic 18: Radiació solar, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 4

	Radiació Solar [W/m²]	Potència diürna [W/m²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Diürna
Màxim	958,90	502,23	37,98	58,58	0,56
Mínim	265,03	16,74	20,91	26,08	0,06
Promig	712,49	336,02	30,93	47,15	0,45

Taula 16: Resum de valors de la radiació solar, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 4



Gràfic 19: Radiació infraroja, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 4



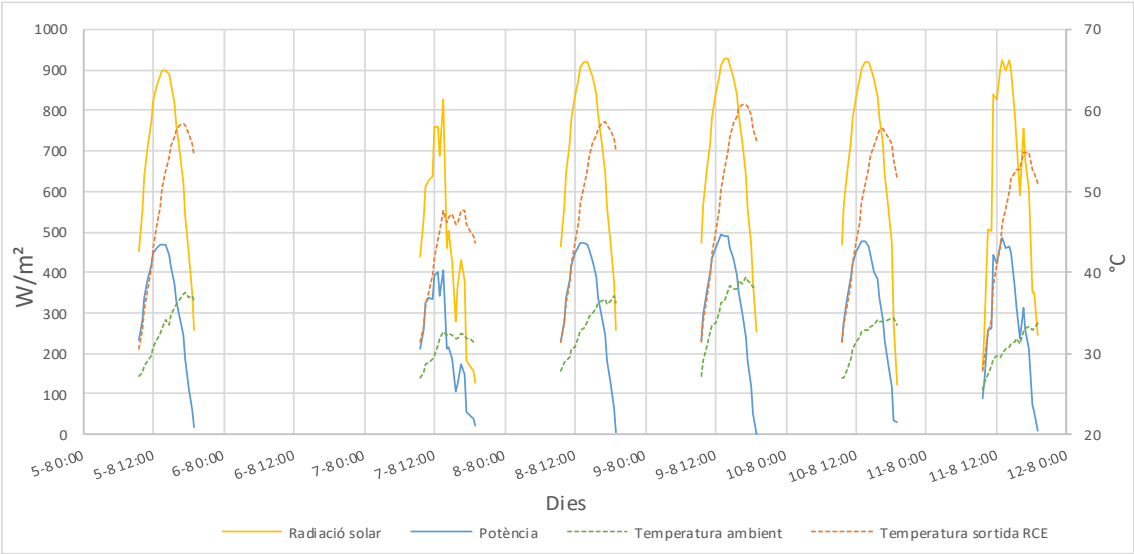
Gràfic 20: Eficiències del dies i nits de la setmana 4

	Radiació infraroja [W/m ²]	Balanç net rad. Infraroja RCE [W/m ²]	Potència Nocturna [W/m ²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Nocturna
Màxim	3541,80	100,54	30,49	31,32	30,33	0,30
Mínim	333,70	52,88	0,28	17,68	16,45	0,00
Promig	699,17	69,81	12,30	23,34	23,21	0,17

Taula 17: Resum de valors de la radiació infraroja, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 4

Setmana 5: 5 al 11 d'agost de 2019

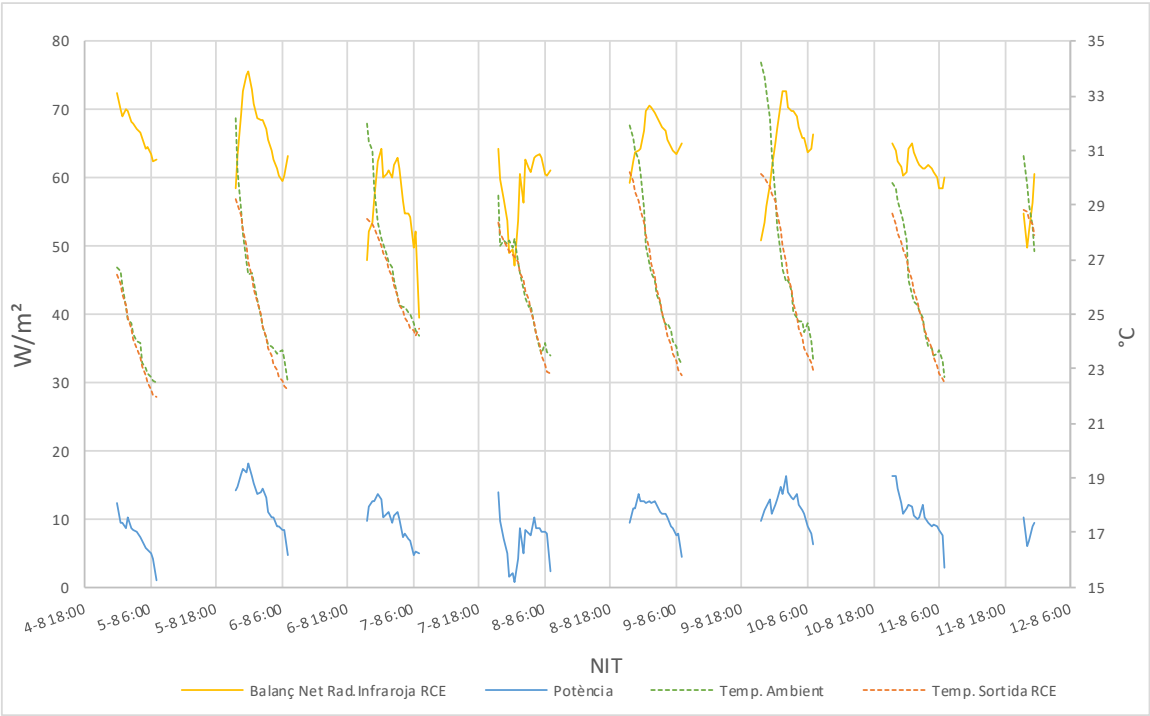
El dia 6 d'agost hi va haver un tall de llum durant tot el dia.



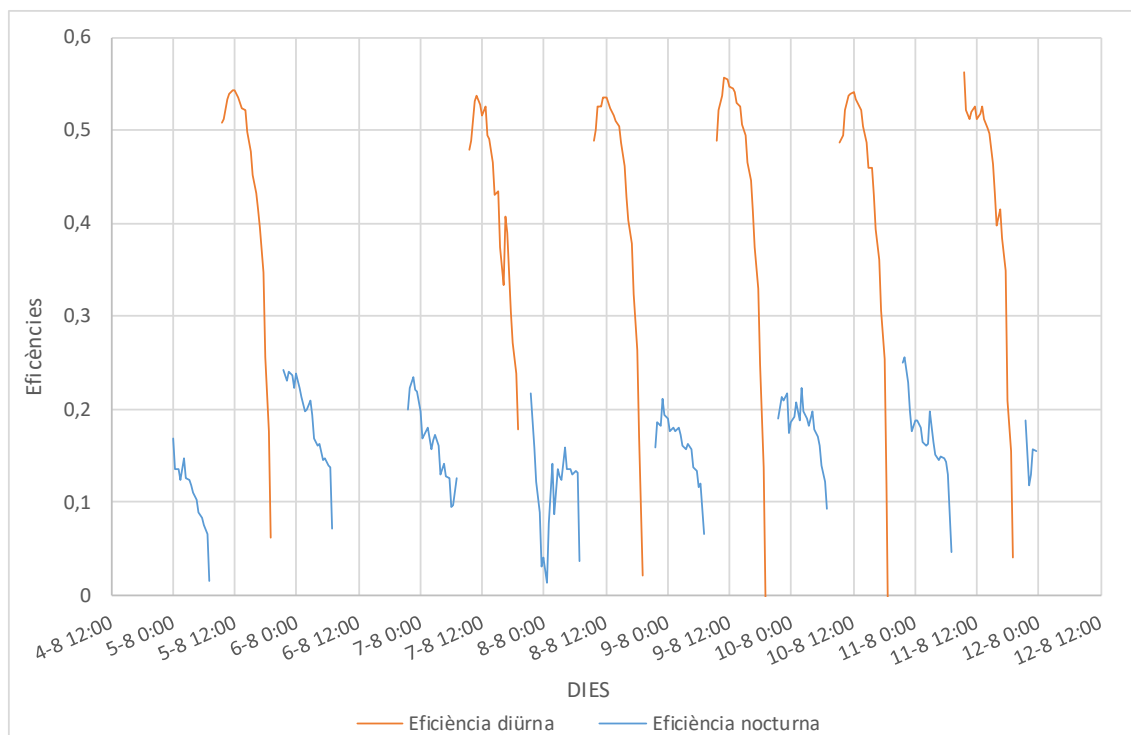
Gràfic 21: Radiació solar, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 5

	Radiació Solar [W/m²]	Potència diürna [W/m²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Diürna
Màxim	928,07	493,05	39,48	60,76	0,56
Mínim	121,20	1,02	25,56	27,89	-0,23
Promig	648,94	301,00	32,71	48,04	0,43

Taula 18: Resum de valors de la radiació solar, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 5



Gràfic 22: Radiació infraroja, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 5

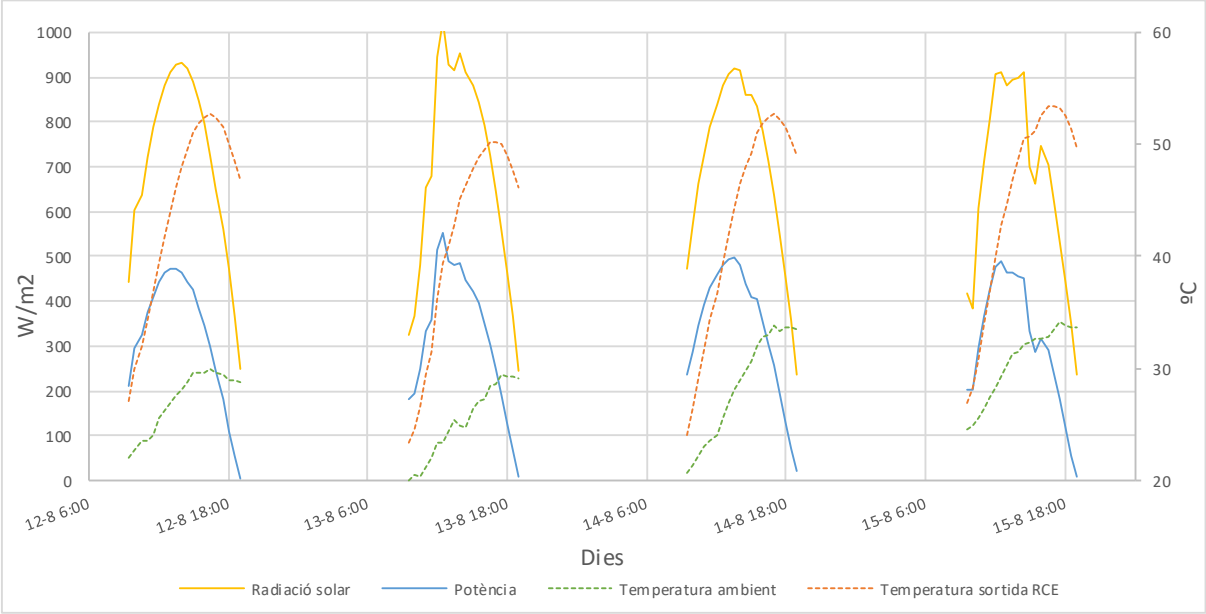


Gràfic 23: Eficiències del dies i nits de la setmana 5

	Radiació infraroja [W/m ²]	Balanç Net rad. Infraroja RCE [W/m ²]	Potència Nocturna [W/m ²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Nocturna
Màxim	429,70	75,69	18,06	34,20	30,23	0,26
Minim	367,24	39,56	0,61	22,50	21,95	0,01
Mitjana	391,25	62,55	9,93	26,27	25,80	0,16

Taula 19: Resum de valors de la radiació infraroja, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 5

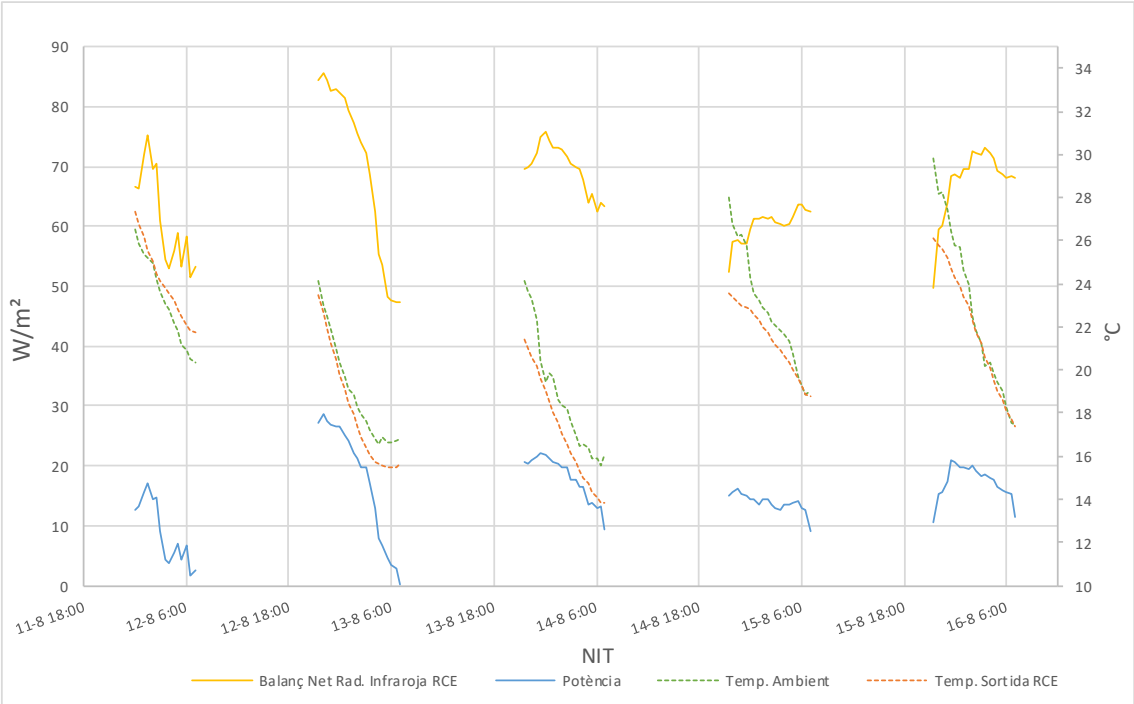
Setmana 6: 12 al 16 d'agost de 2019



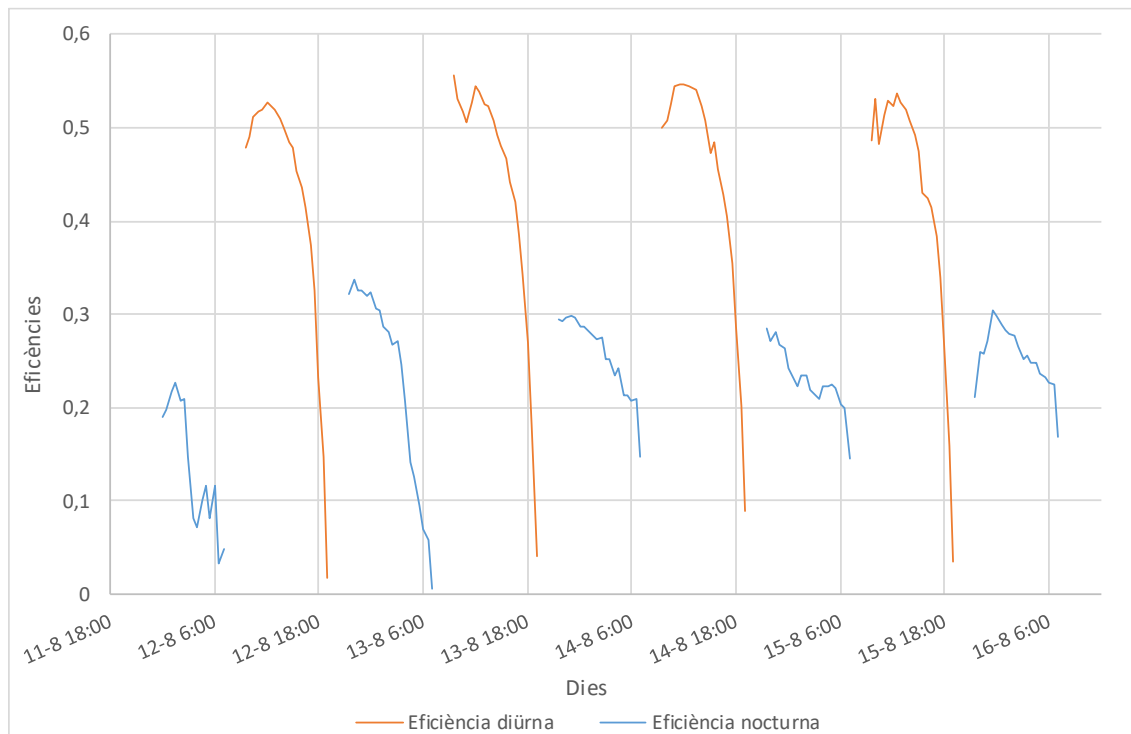
Gràfic 24: Radiació solar, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 6

	Radiació Solar [W/m²]	Potència diürna [W/m²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Diürna
Màxim	1023,07	551,06	34,24	53,48	0,56
Mínim	236,13	4,53	20,02	23,39	0,02
Promig	689,67	320,58	27,88	43,42	0,44

Taula 20: Resum de valors de la radiació solar, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE dels dies de la setmana 6



Gràfic 25: Radiació infraroja, potència i temperatures ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 6



Gràfic 26: Eficiències del dies i nits de la setmana 6

	Radiació infraroja [W/m ²]	Balanç net rad. Infraroja RCE [W/m ²]	Potència Nocturna [W/m ²]	Temp. Ambient [°C]	Temp. Sortida RCE [°C]	Eficiència Nocturna
Màxim	406,12	85,51	28,77	29,82	27,33	0,34
Minim	321,88	47,24	0,29	15,60	13,80	0,01
Mitjana	356,54	65,96	15,44	21,24	20,33	0,23

Taula 21: Resum de valors de la radiació infraroja, potència, temperatura ambient i a la sortida del RCE de les nits de la setmana 6